

Rapports scientifiques et techniques
de l'IFREMER



N° 14 - 1989

**LA CONTAMINATION de la GIRONDE
par le CADMIUM**
origine, extension, importance

Bernard BOUTIER, Jean-François CHIFFOLEAU
Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer.

Jean-Marie JOUANNEAU, Claude LATOUCHE, Isabelle PHILIPPS
Institut de géologie du Bassin d'Aquitaine.



Résumé : Dès les premières campagnes de prélèvement (1979), le Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin a montré que les huîtres de Gironde présentaient des teneurs en cadmium tout à fait anormales. Des études plus détaillées portant sur les gisements naturels de l'estuaire ont mis en évidence un gradient de concentration décroissant de l'amont vers l'aval, identifiant ainsi la Gironde comme source potentielle de contamination. Simultanément, des expériences d'implantation d'huîtres-tests non contaminées à La Fosse et à Dau ont confirmé l'importance et le caractère permanent de cette contamination. L'étude géochimique a montré que l'estuaire est le siège d'un phénomène global de désorption de cadmium à partir de suspensions très riches venues de l'amont: 23 tonnes parviennent annuellement à l'estuaire sous forme particulaire et 1 tonne sous forme dissoute. 1,2 tonne est piégée dans le sédiment, 1 tonne est expulsée à l'océan sous forme particulaire, et 21 tonnes sous forme dissoute. L'origine de cette contamination peut être en grande partie attribuée aux apports des zones minières situées dans le bassin versant du Lot. Son influence sur le plateau continental semble limitée, mais l'éventualité d'un impact sur l'importante zone conchylicole de Marennes-Oléron n'a pu être totalement écartée et doit donc faire l'objet de recherches complémentaires.

Mots clés : cadmium, désorption, estuaire, bilan géochimique, contamination des huîtres.

Abstract : In 1979, the French monitoring program RNO (Réseau National d'Observation de la qualité du milieu Marin) pointed out a dramatic cadmium contamination in the oysters from the Gironde estuary (up to 100 ug. $^{-1}$, dry weight). The wild oyster-beds upstream the estuary were shown to be the most contaminated. This result tends to point to the river as the source of the cadmium contamination. At the same time, uncontaminated oysters from Arcachon were transplanted in the Gironde estuary (La Fosse, Dau). This experiment confirmed the importance and proved the permanence of the contamination. Very high concentrations of dissolved cadmium (400 ng. l^{-1}) were measured in the estuarine mixing zone. This phenomenon can be explained by the desorption of cadmium from cadmium rich particles inflowing from the drainage basin. A mass balance calculation indicates that 23×10^3 kg of cadmium reach the estuary each year associated with particles and 10^3 kg as the dissolved species. Most of this cadmium input ($> 21 \times 10^3$ kg) is exported to the adjacent ocean as dissolved species, $1,2 \times 10^3$ kg are trapped in the sediment, and 10^3 kg exported with particles. A mining area several hundred kilometers upstream in the river lot's drainage basin has been found to be responsible for this contamination. The cadmium enriched plume does not spread far on the continental shelf. Nevertheless, it may reach the straight of Maumusson and eventually affect the Marennes-Oleron oyster farming area. This hypothesis needs further considerations.

Keywords : cadmium, desorption, estuary, geochemical budget, oyster contamination.

Resumen : Desde 1979, los primeros resultados del programa RNO (Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin) han demostrado que las concentraciones en cadmio de las ostras de la Gironde (Francia) son anormalmente fuertes (varias decenas de microgramos por gramo de materia seca.). Ulteriormente, los estudios de ostras salvajes muestran un descenso, río abajo, de las concentraciones en el estuario incriminando la Gironde como responsable de la contaminación que parece ser importante y permanente. Esos datos han sido confirmados por los experimentos de implantación de ostras no contaminadas en la Fosse (orilla izquierda) y Dau (orilla derecha). Las investigaciones sobre el comportamiento del Cd en el estuario revelan un fenómeno de desorción de este metal a partir de la materia en suspensión muy enriquecida en Cd, la cual procede de la parte fluvial del estuario. Se ha podido establecer que 23 T de Cd particulado y 1 T de Cd disuelto llegan anualmente al estuario. De esos aportes 1,2 T va a sedimentar, 1 T de Cd particulado y 22 T de Cd disuelto son expulsadas al océano Atlántico. Son zonas mineras situadas en la cuenca del Lot que son en gran parte responsables de la contaminación observada. Su influencia al nivel de la margen continental parece poco importante. No obstante, en la zona conchícola de Marennes-Oléron, la eventualidad de una contaminación provocada por la Gironde no ha sido todavía eliminada y es lo que motiva investigaciones complementarias.

Palabras claves : cadmio, desorción, estuario, balance geoquímico, contaminación de las ostras.

Service de la Documentation
et des Publications (S.D.P.)
IFREMER - Centre de Brest
BP 70 - 29263 PLOUZANÉ
Tél. 98 22 40 13 - Téléx 940 627 F

ISSN - 0761-3970

© Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, 1989

SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
CHAPITRE 1 - GENERALITES SUR LE CADMIUM	7
1.1.- Concentration dans l'environnement	7
1.2.- Comportement physico-chimique	9
1.3.- Obtention, utilisation, rejets	10
1.4.- Toxicité	10
CHAPITRE 2 - DOMAINE D'ETUDES	13
2.1.- Le bassin d'Aquitaine	13
2.2.- Le plateau continental	13
2.3.- La Gironde	15
2.4.- La baie de Marennes-Oléron	17
2.5.- Le bassin du Lot et du Riou Mort	18
CHAPITRE 3 - METHODOLOGIE	19
3.1.- Etudes basées sur l'utilisation des organismes marins (<i>Crassostrea gigas</i>)	19
3.1.1.- Etude de la répartition géographique des teneurs en cadmium des huîtres	19
3.1.2.- Expérience d'implantation d'huîtres-tests en Gironde	19
3.2.- Etude des phases dissoute et particulaire	20
3.2.1.- Plans d'échantillonnage	20
3.2.2.- Méthodes de prélèvement	20
3.2.3.- Paramètres mesurés - Méthodes analytiques	21
CHAPITRE 4 - ETUDE DE L'ESTUAIRE	23
4.1.- Utilisation des mollusques comme indicateurs quantitatifs de la contamination par le cadmium	23
4.1.1.- Répartition géographique des teneurs en cadmium des huîtres	23
4.1.2.- Aspect cinétique	25
4.1.3.- Synthèse	27
4.2.- Etude la phase dissoute et des solides	27
4.2.1.- Résultats des campagnes	27
4.2.2.- Bilan géochimique	34
4.2.3.- Discussion et enseignements	37

CHAPITRE 5 - L'EXTENSION AU PLATEAU CONTINENTAL ET AUX ABORDS	39
5.1.- Etude de l'eau et des particules	39
5.2.- Etude des sédiments du plateau continental et de la baie de Marennes-Oléron	41
5.2.1.- Sédiments superficiels	41
5.2.2.- Sédiments carottés	44
 CHAPITRE 6 - ETUDE DES BASSINS DU LOT ET DU RIOU MORT	 47
6.1.- Conditions hydrologiques	47
6.2.- Répartition de l'échantillonnage	47
6.3.- Types de prélèvements	47
6.4.- Résultats	48
6.5.- Enseignements	49
 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	 51
 BIBLIOGRAPHIE	 55
 FIGURES	 61
 TABLEAUX	 91

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier par ces lignes tous ceux dont le travail a contribué à l'avancement de cette étude, notamment :

- . L'équipe "Chimie" DERO/EL pour sa collaboration active "in situ".
- . Les équipages des navires océanographiques THALIA, PELAGIA et CRYOS pour leur bonne volonté et leur efficacité de tous les instants.
- . MM. J.Y. Lapaquellerie, G. Lavaux et P. Pedemay pour leur collaboration tant en ce qui concerne l'échantillonnage que les analyses en laboratoire.
- . MM. D. Cossa et C. Alzieu pour leurs relectures et leurs critiques pertinentes du manuscrit.

INTRODUCTION

La surveillance systématique de la qualité du milieu littoral français menée dans le cadre du "Réseau National d'Observation" (R.N.O.) a mis en évidence un problème aigu de contamination des huîtres par le cadmium en Gironde (Boutier, 1981). De plus, bien que beaucoup plus faibles qu'en Gironde, les concentrations en cadmium observées dans les huîtres de Marennes-Oléron sont nettement supérieures à celles des huîtres provenant d'autres régions ostréicoles françaises (f.1). Compte tenu de la toxicité du cadmium pour le rein et de son potentiel cancérigène (Anonyme, 1988), nous avons entrepris dans ces régions différentes actions visant à :

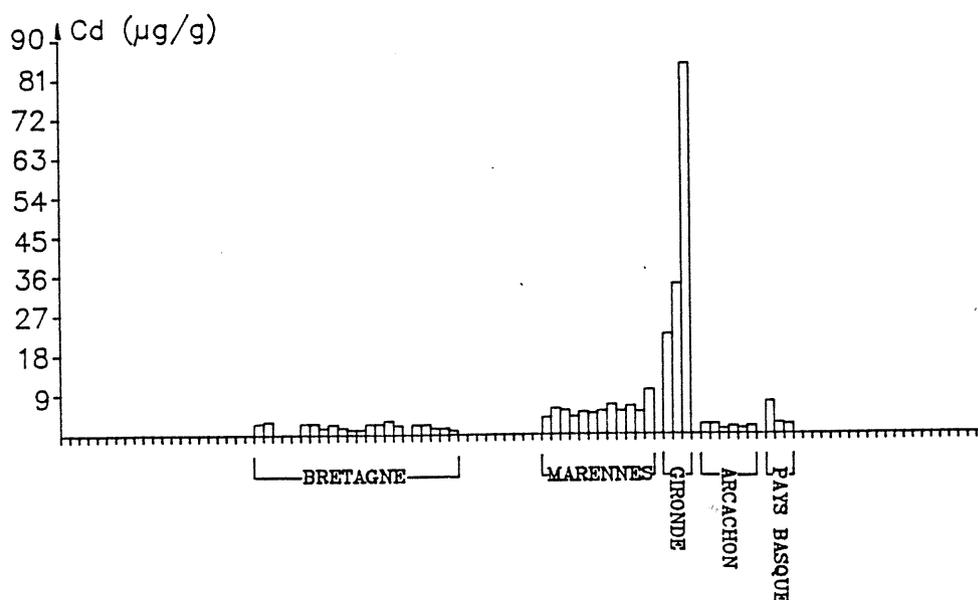


Figure 1 - Teneurs en cadmium des huîtres du littoral français (µg/g, poids sec).

- déterminer les concentrations en cadmium dans les divers compartiments du milieu afin de préciser les échanges entre les différentes phases et d'évaluer l'apport terrigène ;
- rechercher les traces d'une extension de la contamination sur le plateau continental ;
- déterminer l'origine des apports.

Les recherches devant nous permettre d'atteindre ces objectifs ont porté sur les trois parties du système : estuaire, plateau continental et bassin versant.

L'estuaire a été étudié tout d'abord en utilisant l'huître comme indicateur de contamination, puis directement sous l'aspect géochimique au cours des campagnes CAGIMA (Cadmium Gironde Marennes) I (26 juin - 3 juillet 1984), CAGIMA II (20 février - 5 mars 1985) et INTERSITE III (30 août - 12 septembre 1985).

Nous avons alors cherché à préciser la dynamique du cadmium dans l'estuaire et à établir un bilan géochimique de cet élément pour en évaluer les exportations nettes vers le milieu littoral.

D'autres travaux ayant déjà signalé la possibilité d'une influence des eaux issues de Gironde sur le bassin de Marennes-Oléron (Pouliquen, 1975 ; Jouanneau et al., 1985), nous avons recherché sur le plateau continental et dans la baie des traces de cette influence en ce qui concerne le cadmium. Ces travaux, réalisés au cours des campagnes CAGIMA ont porté sur la phase dissoute, les particules en suspension, et les sédiments.

Enfin, les apports du bassin versant ont fait l'objet d'une étude partielle et préliminaire sur un site soupçonné, au vu des données de l'agence de bassin Adour-Garonne, d'être à l'origine de la contamination. Ces investigations ont porté sur le sédiment et l'eau du Lot (entre Cahors et le confluent du Riou Mort) et le Riou Mort lui-même, fortement contaminé par les installations minières de Viviez.

CHAPITRE 1
GENERALITES SUR LE CADMIUM

Nous ne mentionnons ici que les éléments nécessaires à la compréhension de l'étude que nous avons menée. Pour plus de détails, le lecteur pourra se reporter à l'une des nombreuses synthèses sur le cadmium déjà publiées (Mohlenberg et Jensen, 1980 ; Simpson, 1981 ; Cossa et Lassus, 1989).

1.1.- CONCENTRATIONS DANS L'ENVIRONNEMENT

1.1.1.- EAUX DOUCES (t.1)

Les concentrations y sont normalement peu élevées. Des teneurs de 10 à 20 ng/l peuvent être adoptées comme niveau de base des eaux douces, bien que Boyle et al. (1982) aient observé des niveaux de 1 ng/l dans le bassin versant de l'Amazone où les engrais chimiques ne sont pas utilisés.

ORIGINE	CONCENTRATION (ng.l ⁻¹)	REFERENCE
Mississippi	15	SHILLER et BOYLE (1983)
Amazone	<10	BOYLE <u>et al.</u> (1982)
Yang Tse	<4	ELBAZ-POULICHET <u>et al.</u> (1987)
Dordogne	20	ELBAZ-POULICHET <u>et al.</u> (1987)
Dordogne	10	Ce travail
Gironde	10 à 250	Ce travail
Göta	8-20	DANIELSSON <u>et al.</u> (1983)
Saint-Laurent	13	COSSA (1987)

Tableau 1 : Concentration en cadmium dissous des eaux douces.

1.1.2.- EAUX DE MER (t.2)

Les teneurs sont très variables selon la profondeur du prélèvement et le lieu. En ce qui concerne les eaux superficielles, les niveaux naturels peuvent varier entre 0 et 20 ng/l, selon la consommation phytoplanctonique. Les eaux profondes océaniques sont en général enrichies par la décomposition du phytoplancton.

LIEU	Cd (ng/l)	REFERENCES
Atlantique N.E. Large Noirmoutier	23	BERMAN <u>et al.</u> (1983)
Manche Mer du Nord	20-25	DANIELSSON <u>et al.</u> (1985)
Mer du Nord (Southern Bight)	20-30	DUINKER <u>et al.</u> (1982)
Mer Baltique	30	DANIELSSON et WESTERLUND (1984)
Mer Baltique	30	KREMLING et PETERSEN (1984)
Atlantique (N.O.)	20	BRULAND et FRANKS (1983)
Eaux côtières danoises (Kattegat)	23	MAGNUSSON et RASMUSSEN (1982)
Eaux côtières belges	13-77	MART (1982)

Tableau 2 : Concentrations en cadmium dissous des eaux du plateau continental.

LOCALISATION	TENEURS	REFERENCES	REMARQUES
HUMBER (G.B.)	0.23	BALLS, (1985)	
Gironde	0.35	DONARD, (1983)	Période d'étiage Teneurs plus élevées en période de florai- son planctonique
Elbe	2-4	DUINKER <u>et al</u> (1982)	
Pacifique N.E. (Californie)	2-5	MARTIN et BROENKOW (1975)	Particulaire plancto- nique
Pacifique N.E.	20	"	"
Pacifique N.E.	5.4	KNAUER et MARTIN (1981)	Particulaire plancto- nique

Tableau 3 : Concentration en cadmium dans le matériel particulaire marin (microgrammes par gramme de poids sec).

1.1.3.- PARTICULES (t.3)

Selon leur nature, elles peuvent être plus ou moins chargées en cadmium ; les teneurs peuvent varier de quelques fractions de microgramme par gramme pour une matière particulaire strictement minérale à plusieurs dizaines pour du phytoplancton se développant dans une zone de remontée d'eaux profondes.

1.1.4.- SEDIMENT

Le niveau de référence habituellement retenu en ce qui concerne les sédiments marins fins est de 0,2 µg/g (Salomons et Forstner, 1984). Cependant, dans des sédiments très chargés en matière organique, on peut observer des teneurs plus élevées sans qu'une contamination puisse être mise en cause.

1.2.- COMPORTEMENT PHYSICO-CHIMIQUE

L'étude des formes chimiques du cadmium et de leurs interactions avec les différents compartiments du milieu est une étape essentielle de l'évaluation de l'influence potentielle d'un apport de cadmium sur l'environnement.

En solution dans l'eau douce, le cadmium est principalement présent sous forme libre ou complexée par des ligands organiques. Quand le pH augmente, il précipite sous forme de carbonate.

Dans l'eau de mer, c'est sous forme de complexes chlorures que l'on trouve principalement le cadmium dissous (Long et Angino, 1977). Leur stabilité est suffisante pour empêcher en grande partie l'association du cadmium avec des molécules organiques en milieu marin ; un phénomène de compétition avec les métaux alcalins vis à vis des ligands organiques vient encore renforcer cette tendance (Mantoura et al., 1978).

La physico-chimie du cadmium en milieu marin et estuarien est très marquée par les échanges dissous-particulaire.

Comme tous les éléments métalliques, le cadmium pourrait être précipité à l'interface eau douce-eau de mer, par adsorption sur les hydroxydes de fer et de manganèse amorphes (Sholkovitz, 1978). Toutefois, il semble que ce phénomène puisse être masqué par une remise en solution du cadmium particulaire. Bien que ce mécanisme ne soit pas encore expliqué dans le détail, il semble être assez général dans les estuaires à forte turbidité et à fort temps de résidence des particules. La stabilisation du cadmium sous forme de complexes chlorures pourrait en être une étape importante.

Plus au large, le cadmium apparaît très étroitement lié au phytoplancton, comme en témoigne le parallélisme des profils en cadmium et phosphates en milieu océanique (Boyle et al., 1976).

Dans le sédiment, le comportement du cadmium est très lié à la dégradation de la matière organique et aux variations de potentiel rédox qu'elle entraîne. Des études réalisées sur des sédiments carottés en milieu littoral ont montré que le cadmium lié à la matière organique détritique était libéré dans les horizons superficiels aérobies. Une partie du cadmium ainsi mobilisé peut retourner vers la colonne d'eau, l'autre partie diffusant vers le bas, où les conditions plus réductrices peuvent amener sa précipitation sous forme de sulfures.

Dans des conditions très réductrices, la formation de polysulfures solubles peut intervenir (Gobeil et al., 1987).

1.3.- ORIGINE, UTILISATION, REJETS (d'après Cossa et Lassus, 1989)

Le cadmium est obtenu exclusivement comme sous-produit de l'industrie minière du zinc et du plomb. La production mondiale annuelle est de 20.000 tonnes environ, dont 4 % pour la France.

Les principales utilisations du cadmium sont :

. les traitements de surface	35 %
. les pigments	25 %
. les stabilisants et plastifiants	15 %
. les accumulateurs	15 %
. divers	10 %

Notons dès à présent qu'avec deux usines de production d'accumulateurs et un complexe minier qui était encore en activité en 1987, les bassins versants de la Garonne et de la Charente apparaissent tout particulièrement exposés aux apports de cadmium.

1.4.- TOXICITE

1.4.1.- EFFETS SUR LES ORGANISMES MARINS

La toxicité aigüe n'apparaît qu'à des doses de plusieurs milligrammes par litre, qui ne sont jamais rencontrées même dans un environnement contaminé.

Des effets sublétaux comme l'érosion des nageoires des poissons plats ou des perturbations des fonctions respiratoire ou reproductrice chez les invertébrés marins peuvent apparaître à des concentrations de quelques microgrammes par litre, qui ne sont pratiquement jamais observées dans l'environnement littoral.

Les études portant sur les effets de concentrations de quelques dizaines à quelques centaines de nanogrammes par litre sont rares. Cossa et Lassus citent un travail de Sanders et Cibik (1985) qui observent une réduction du nombre d'hypnospores dans les populations de *Chaetoceros debile* exposées à des teneurs en cadmium de 50 ng/l.

Dans le règne animal, on a constaté qu'à partir d'un certain seuil de concentration dans l'environnement, des organismes comme les huîtres étaient capables de synthétiser une protéine complexante qui immobilise le cadmium sous une forme inoffensive pour elles (Noel - Lambot, 1978).

1.4.2.- EFFETS SUR L'HOMME

Les propriétés néphrotoxiques du cadmium chez l'homme sont maintenant bien établies.

En 1972, l'organisation mondiale pour la santé recommandait de ne pas absorber plus de 400 µg de cadmium par semaine. Plus récemment, certains travaux ont montré que des désordres importants pouvaient

intervenir à des doses jusque là considérées comme acceptables (Nicholson, 1983).

Les risques encourus par les individus exposés au cadmium ont été réévalués récemment par un groupe d'experts du Centre international de recherches sur le cancer, qui l'ont classé dans la catégorie des substances "probablement cancérigènes pour les êtres humains" (Anonyme, 1988).

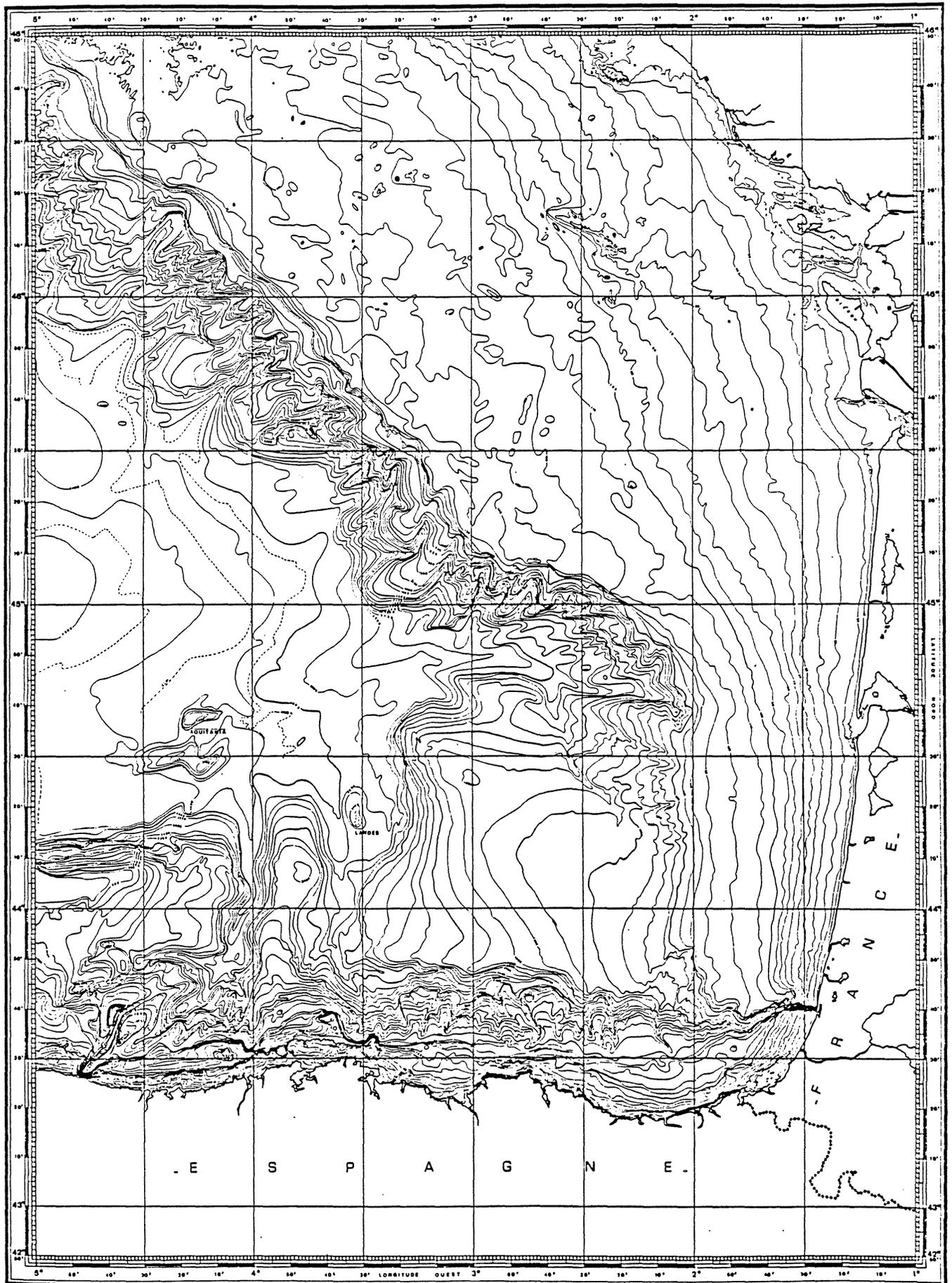


Figure 2 - Bathymétrie du plateau continental aquitain. (équidistance des isobathes 10 m).

CHAPITRE 2 DOMAINES D'ETUDE

2.1.- LE BASSIN D'AQUITAINE

Le bassin d'Aquitaine, situé dans le quart sud-ouest de la France, est un bassin sédimentaire ouvert à l'ouest sur l'océan Atlantique. Il est constitué de plaines et de plateaux d'altitude faible. Il est bordé par différents massifs montagneux :

- au sud, les Pyrénées qui culminent à plus de 3.000 m,
- au nord-est, le Massif Central, qui ne dépasse que rarement 1.700 m,
- au sud-est, la Montagne Noire dont les sommets atteignent 1.200 m.

L'Aquitaine a pour principal bassin hydrologique le bassin versant de l'estuaire de la Gironde qui occupe une surface de 71.000 km² environ, ce qui représente le 1/7ème du territoire français.

De petits bassins secondaires trouvent également leur place : au nord celui de la Charente et de la Sèvre Niortaise, au sud celui de l'Adour et au centre dans la zone drainée des sables plio-quadernaires, le petit bassin de l'Eyre.

2.2.- LE PLATEAU CONTINENTAL

2.2.1.- MORPHOLOGIE

Le plateau continental nord-aquitain s'étend du nord de la Gironde par 45°45'N, au sud du bassin d'Arcachon par 45°25'N (f.2).

Cette partie du plateau continental est limitée à l'est par une côte sableuse rectiligne, de direction N 6° et à l'ouest par la rupture de pente du talus continental de direction N 130° à N 135°.

Ainsi, le plateau continental s'étend sur plus de 160 km au droit de la Gironde et sur 60 km environ au large du bassin d'Arcachon.

Deux unités sont distinguées : un secteur côtier qui regroupe les systèmes margino-littoraux jusqu'à une profondeur de 20 m, et la plateforme proprement dite.

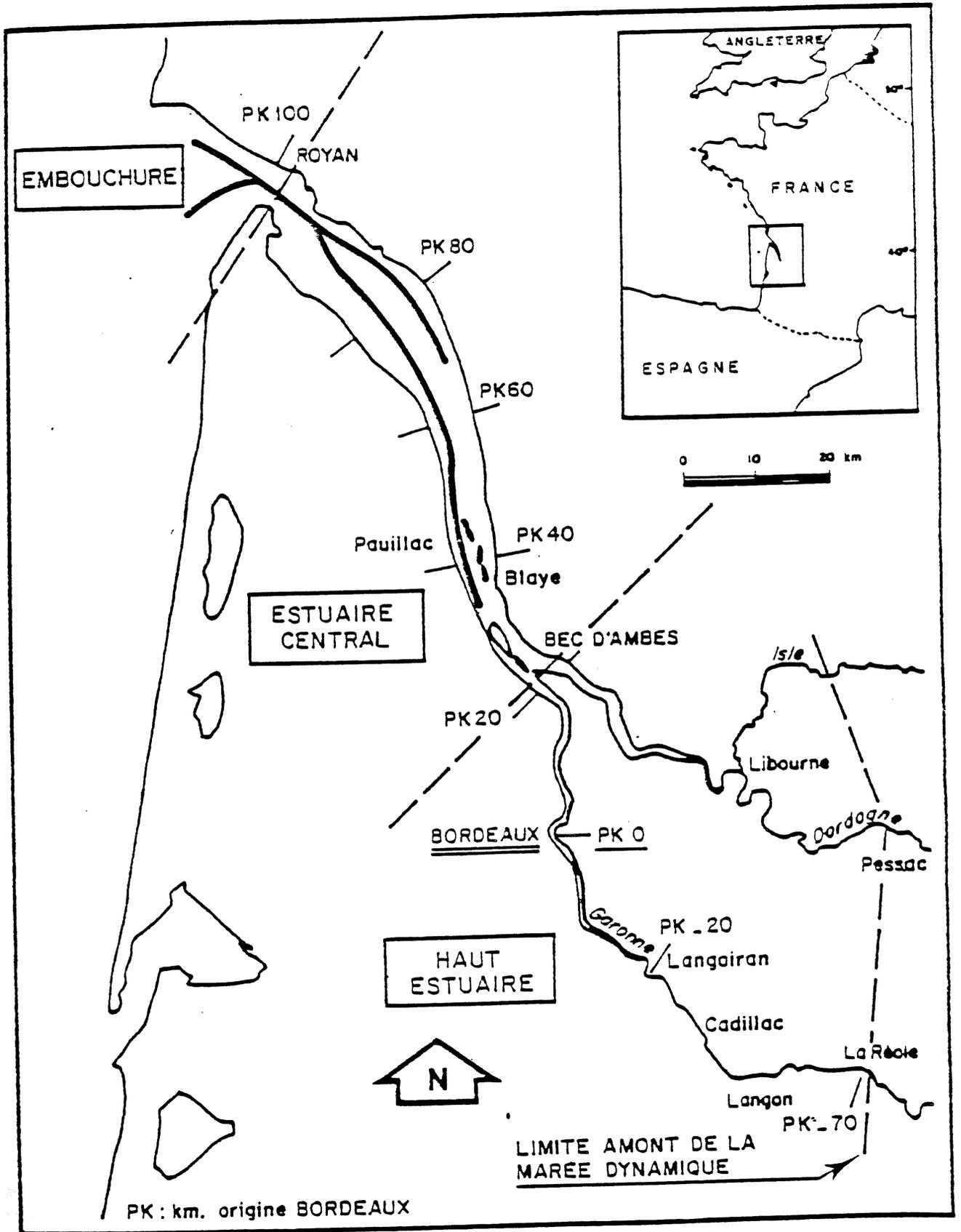


Figure 3 - Cadre schématique de l'estuaire de la Gironde.

2.2.2.- COUVERTURE SEDIMENTAIRE

Les sédiments se répartissent en trois bancs allongés parallèlement aux courbes bathymétriques (Castaing, 1981) :

- une zone externe localisée sur les fonds compris entre 75 et 120 m de profondeur et essentiellement occupée au nord par des vases (Grande Vasière) et au sud par des sables littoraux tardi-glaciaires et du début de l'Holocène,
- une zone médiane située entre 30 et 75 m de profondeur où se trouvent à l'affleurement les sédiments les plus grossiers (galets et graviers) apportés par les fleuves lors de la régression würmienne et des régressions antérieures,
- une zone interne entre la côte et - 30 ou - 50 m selon les zones où se dépose la plus grande partie des sédiments actuels. On y rencontre, en particulier, la vasière Ouest-Gironde qui s'étend entre les latitudes de l'embouchure de la Gironde et du pertuis de Maumusson entre - 30 et - 60 m de profondeur. Cette vasière constitue actuellement sur le plateau interne la zone de dépôt des sédiments fins la plus importante.

2.3.- LA GIRONDE

2.3.1.- MORPHOLOGIE

L'estuaire est constitué par la jonction au bec d'Ambès des réseaux hydrographiques de la Garonne et de la Dordogne. L'estuaire, du bec d'Ambès à l'océan, occupe à marée haute une superficie de 625 km².

La forme de l'estuaire est très régulière et les principaux paramètres morphologiques varient de façon exponentielle de l'embouchure à la limite d'action dynamique de la marée, située à plus de 70 km en amont de Bordeaux. Ceci traduit l'état de maturité atteint par l'estuaire, ainsi que son équilibre dynamique vis-à-vis des conditions du milieu.

De la limite d'action dynamique de la marée jusqu'à l'embouchure, on passe d'une rivière à méandres à un environnement marin côtier.

On distingue plusieurs divisions entre ces deux types extrêmes (f. 3) .

a) La partie fluviale de l'estuaire

En amont du bec d'Ambès, la Garonne et la Dordogne présentent toutes les caractéristiques des rivières à méandres. On y reconnaît ainsi un thalweg unique serpentant entre une succession alternée de barres de méandres et de rives concaves. Des levées naturelles, derrière lesquelles se développent des arrières marais, s'érigent sur certaines rives.

b) L'estuaire proprement dit

Cette région, comprise entre le bec d'Ambès et l'embouchure est longue de 76 km ; elle constitue la partie principale de l'estuaire. Sa largeur maximale à marée haute varie de 2 km au bec d'Ambès à 11 km un peu en aval de la pointe de Grave.

Deux zones peuvent y être reconnues :

- *la zone amont entre le bec d'Ambès et Saint Christoly.* La morphologie y est complexe et généralement caractérisée par un système de chenaux secondaires séparés par des barres de marée et des îles. Le chenal principal, dit de navigation, profond de 6 à 10 m, suit la rive gauche.
- *la zone aval.* Après Saint-Christoly, l'estuaire, d'une morphologie plus simple, est constitué par deux chenaux distincts séparés par une succession de barres de marée allongées. Le chenal principal suit la rive gauche. La profondeur, de l'ordre de 6 m, est constante jusqu'à une rupture de pente localisée à 10 km en amont de l'embouchure. En aval de ce point, la profondeur augmente nettement atteignant 30 m à l'embouchure. Le chenal de Saintonge suit la rive droite, sa profondeur augmente régulièrement vers l'aval et atteint 15 m juste avant l'embouchure. C'est dans cette partie de l'estuaire que les zones intertidales sont les plus étendues. Elles atteignent une largeur maximum de 1,2 km en rive droite.

c) L'embouchure

Au niveau du Verdon, le chenal principal et le chenal de Saintonge se réunissent pour n'en former qu'un seul, profond de 30 m, entre la pointe de Grave et Royan. A l'ouest de ce point, on retrouve deux chenaux séparés par une formation calcaire recouverte de gravier et de sable grossier. Le chenal de navigation longe la rive droite selon une direction ouest - nord-ouest, puis s'oriente à l'O-SO, jusqu'au plateau continental interne. L'autre chenal, passe sud, moins profond, est situé au sud et orienté S-SO.

2.3.2.- REPARTITION DES SEDIMENTS DANS L'ESTUAIRE

a) Partie fluviale et estuaire amont

En général, on trouve des silts et argiles dans les chenaux, des sables argileux et des argiles dans les étroites zones intertidales, le long des rives. Des variations lithologiques saisonnières se produisent dans les chenaux, surtout dans la partie amont de l'estuaire. Pendant les périodes de fort débit fluvial (hiver et printemps), du sable se dépose dans les chenaux. Ces variations saisonnières provoquent la formation du faciès caractéristique des chenaux; une alternance de lits sableux et de lits argileux avec, en général, prédominance de ces derniers.

Dans la partie de l'estuaire comprise entre 15 et 30 km de l'embouchure se trouvent de vastes zones intertidales qui progressent

lentement à certains endroits. Les schorres, bien établis dans les parties hautes, gagnent vers l'aval à la vitesse moyenne de 20 m/an.

b) Le bas - estuaire

Il existe, dans cette partie de l'estuaire, un contraste lithologique marqué. A l'aval d'un point situé à quelques 20 km de l'embouchure, les fonds sont couverts de sable moyen et grossier. Le contact argile-sable se fait plus en amont dans le chenal principal que dans le chenal de Saintonge.

C'est dans cette partie de la Gironde que la zone intertidale atteint son extension maximum : plus de 3 km à marée basse près de Mortagne sur la rive droite et près du Verdon sur la rive gauche. Parallèlement à une augmentation de l'activité biologique (Lamellibranches marins fouisseurs), le rapport sable/argile croît à l'aval d'une ligne située à 20-30 km de l'embouchure. Juste avant l'embouchure, les faciès de la zone intertidale acquièrent un cachet beaucoup plus marin. Seules quelques rares laminations sont préservées par les nombreux terriers, indices d'une activité biologique intense.

c) L'embouchure

L'éventail des sédiments varie des sables fins bien classés, aux graviers et sables grossiers très mal classés. Les sédiments du chenal principal ont une granulométrie moyenne à grossière. Sur le plateau de Cordouan et le banc de La Coubre, le sable est plus fin et mieux classé.

2.4.- LA BAIE DE MARENNES-OLERON

2.4.1.- MORPHOLOGIE

La baie de Marennes-Oléron au sens strict est située entre l'île d'Oléron et la côte de la Charente-Maritime ; elle est limitée vers le nord au parallèle de l'île d'Aix.

Elle communique avec l'océan à ses deux extrémités; par le pertuis de Maumusson au sud et par les passes de l'ouest et de l'est vers le pertuis d'Antioche au nord. Deux fleuves s'y jettent. Il s'agit de la Charente au nord et de la Seudre au sud.

La superficie de la baie proprement dite est de 150 km² à la cote + 5 (cartes marines). L'étendue du domaine intertidal 100 km² est donc très importante.

2.4.2.- COUVERTURE SEDIMENTAIRE

Deux faciès types peuvent être rencontrés ; d'une part les sables (teneurs en fraction fine < 10 %) et, d'autre part, les vases (teneur en fraction fine (< 63 um) > 90 %).

Géographiquement, on distingue :

- un faciès vaseux prédominant qui s'étend sur la partie orientale du bassin, il inclut entre autres le bas-estuaire de la Charente, et les slikkes du marais de Brouage ;
- un faciès sableux pur, constituant l'axe de symétrie sud-nord du bassin, occupe les fonds des chenaux entre Maumusson et Lamouroux ainsi que tous les bancs médians ;
- au nord de Lamouroux, le fond des chenaux est constitué soit de vase sableuse soit de sable vaseux ; ce faciès comprend également les fonds du Coureau d'Oléron ;
- les estrans de la côte oléronnaise peuvent être considérés comme mixtes ; en général, la teneur en pelites est de 30 à 50 % ;

2.5.- LE BASSIN DU LOT ET DU RIOU MORT

Le bassin versant du Lot, orienté est-ouest draine une superficie de 11.840 km². Il peut être divisé, de l'amont vers l'aval, en trois zones (Tourenq et al., 1978) :

- bassins du haut Lot et de la Truyère, jusqu'à Capdenac, dans des terrains cristalophylliens et éruptifs et des calcaires secondaires ;
- entre Capdenac et Fumel, c'est la région des causses du Quercy ;
- entre Fumel et la Garonne, la zone aval du bassin est constituée de terrains sédimentaires cénozoïques.

A la confluence avec la Garonne, le débit liquide annuel moyen est d'environ 150 m³.s⁻¹. Les hautes eaux se produisent de décembre à avril (maximum environ 500 m³.s⁻¹) les étiages d'été peuvent être très marqués. Il faut toutefois souligner que les débits sont régulés par les barrages EDF construits sur le haut Lot et la Truyère.

Au niveau de Boisse-Penchat, à environ 200 km de sa source, le Lot reçoit sur sa rive gauche le Riou Mort qui draine avec ses tributaires (Riou Viou, Enne et Banel) la région de Decazeville-Viviez. Cette région est très industrialisée et les cours d'eau reçoivent les eaux usées de nombreux égouts, ainsi que les effluents de diverses activités (houillères, usines chimiques et métallurgiques).

Le Riou Mort ne contribue que pour 1 % dans le débit annuel du Lot. Cependant, en période d'étiage cette contribution peut atteindre 5 % elle est alors constituée à 90 % par des effluents domestiques et industriels en aval de Viviez et Decazeville (Say, 1978).

CHAPITRE 3 METHODOLOGIE

3.1.- ETUDES BASEES SUR L'UTILISATION DES ORGANISMES MARINS (*Crassostrea gigas*)

3.1.1.- ETUDE DE LA REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES TENEURS EN CADMIUM DES HUITRES

Basée sur la capacité des huîtres à intégrer les variations de concentration d'un polluant métallique dans le milieu, cette étude se proposait tout d'abord de localiser l'apport de cadmium en mettant en évidence une évolution des teneurs dans les huîtres des différents gisements situés en Gironde.

Pour cela, nous avons prélevé des échantillons entre Talmont et Bonne Anse, où la présence d'huîtres était déjà connue (f.4). *

Nous avons mis à profit la présence simultanée d'huîtres et de moules à La Chambrette et à Cabiroux pour comparer en un même site les niveaux d'accumulation de ces deux espèces.

3.1.2.- EXPERIENCE D'IMPLANTATION D'HUITRES TEST EN GIRONDE

L'hypothèse d'un apport de cadmium sous une forme disponible pour les huîtres en hiver ayant été avancée, il a été décidé d'utiliser les capacités intégratrices de ces organismes pour essayer de cerner cet apport dans le temps.

Des lots d'huîtres-tests de trois ans provenant d'Arcachon ont été implantées à La Fosse (rive gauche) et Dau (rive droite) au printemps et en automne (f.4).

L'évolution de la concentration en Cd dans les animaux a été suivie en prélevant chaque mois des échantillons qui ont été conditionnés et analysés par spectrophométrie d'absorption atomique selon la méthode utilisée par le R.N.O. et décrite par Y.Thibaud (1983).

* A partir du chapitre 3, les figures et tableaux ont été reportés à la fin, p. 61 et sv.

3.2.- ETUDE DES PHASES DISSOUTE ET PARTICULAIRE

Cette étude s'est révélée nécessaire à la compréhension des niveaux de cadmium observés dans les mollusques.

Elle a été réalisée au cours des campagnes CAGIMA I, CAGIMA II et INTERSITE III, pour ce qui concerne l'estuaire et le plateau continental. Le domaine fluvial a également été étudié au cours d'une campagne réalisée entre les 27 et 30 janvier 1986.

3.2.1.- PLANS D'ECHANTILLONNAGE

a) Les campagnes CAGIMA I (26 juin - 3 juillet 1984) et II (20 février - 5 mars 1985)

L'objectif de ces campagnes étant d'étudier le comportement du cadmium dans l'estuaire et d'examiner l'influence des apports girondins sur le plateau continental, nous avons adopté un plan d'échantillonnage comportant des radiales dans l'estuaire, entre la côte et le large, et au niveau des pertuis charentais (t. 4-5, f. 5). Au cours de la campagne CAGIMA I, des prélèvements de fond ont été également effectués.

Le plan d'échantillonnage des sédiments superficiels a été établi sur des bases semblables, mais il a évidemment fallu tenir compte de la nature des fonds rencontrés car notre intérêt portait essentiellement sur les sédiments fins (f. 6).

b) La campagne INTERSITE III a porté principalement sur l'estuaire (f. 5, t. 6)

c) Campagnes concernant le bassin versant

Notre attention a porté principalement sur le Riou Mort, qui draine la zone industrielle de Decazeville (f. 7). Le Lot, entre l'amont de Cahors et son confluent avec le Riou Mort, a été également étudié.

Enfin, nous mentionnons également dans cette étude les résultats obtenus sur des carottes prélevées antérieurement en Gironde (Bonne Anse, Le Verdon) et en baie de Marennes-Oléron (Le Chateau) (f. 6).

3.2.2.- METHODES DE PRELEVEMENT

a) Dans la colonne d'eau

Les prélèvements de fond ont été faits à l'aide d'une bouteille GO-FLO recouverte intérieurement d'un film de Teflon.

Les prélèvements de surface ont été réalisés soit à la main, à partir d'un zodiac, soit, quand la mise à l'eau du zodiac était impossible, à l'aide des bouteilles GO-FLO.

Par ailleurs, un prélèvement de 220 litres d'eau a été réalisé par pompage en Gironde. La matière en suspension en a été extraite par centrifugation (centrifugeuse Wesfalia).

b) Dans les sédiments

Les carottes ont été prélevées manuellement dans les zones vaseuses intertidales à l'aide de tubes en PVC de 12 cm de diamètre dont l'extrémité est munie d'un diaphragme de type "peau d orange" en PVC.

Sur le plateau et en Gironde, les sédiments superficiels ont été recueillis dans leur majorité à la benne Schipeck, le prélèvement lui-même étant alors fait manuellement au centre du godet le plus loin possible des parois de l'engin. Quelques prélèvements ont été réalisés au moyen d'un carottier Reineck sur la vasière Ouest-Gironde et d'autres avec une benne à main de type Eckman à partir d'un zodiac dans les zones les plus internes de la baie de Marennes-Oléron.

Dans le bassin versant, les sédiments ont été recueillis à la main avec une spatule en PVC sur les berges (dépôt de crue).

3.2.3 - PARAMETRES MESURES - METHODES ANALYTIQUES

a) Dans la colonne d'eau

La salinité, la température, la turbidité et les matières en suspension ont été mesurées selon les méthodes employées habituellement dans le cadre du R.N.O. (Aminot et Chaussepied, 1983).

Le carbone organique particulaire a été mesuré par voie humide (Strickland et Parsons, 1968).

La chlorophylle a été dosée en spectrofluorimétrie après extraction par l'acétone (Neveux, 1983).

Le cadmium dissous a été dosé par redissolution anodique après filtration sur membrane nuclepore (0,4 μm), acidification par HNO_3 (Merck Suprapur) et stockage dans des flacons de polyéthylène préalablement nettoyés à l'acide chlorhydrique concentré et à l'acide nitrique dilué. Toutes ces opérations se sont déroulées sous hotte à flux laminaire afin d'éviter les contaminations. Cette procédure a été testée lors d'un exercice d'intercalibration organisé par le CIEM (Berman et al., 1986) et s'est révélée satisfaisante.

Le cadmium particulaire : après filtration des échantillons destinés à l'analyse du cadmium dissous, les filtres recueillis sur certaines stations des campagnes CAGIMA II et INTERSITE III ont été conservés. Après attaque par HF, HCl et HNO_3 , ils ont été analysés par absorption atomique (Eggiman et Betzer, 1976).

b) Dans les sédiments

Les analyses suivantes ont été réalisées : teneur en eau, granulométrie, teneur en carbonates de calcium, teneur en carbone organique particulaire, analyse des éléments majeurs, analyse des éléments traces, analyse du cadmium.

La teneur en eau telle qu'elle a été mesurée ici est celle répondant aux normes des géotechniciens, c'est-à-dire :

$$W \% = \frac{\text{Poids eau}}{\text{Poids sédiment sec}} \times 100$$

Granulométrie : s'agissant essentiellement de sédiments fins, il a été procédé à une analyse microgranulométrique à l'aide d'un sédigraphe 5.000. Le sédiment est préalablement attaqué à H_2O_2 20 vol. et dispersé (hexamétaphosphate de Na et ultra sons).

Les teneurs en CaCO_3 ont été mesurées classiquement au Calcimètre Bernard.

Les teneurs en C.O.P sont déterminées selon la procédure de Strickland et Parsons 1968, modifiée par Etcheber, 1981 ; c'est une méthode d'oxydation par mélange sulfochromique, l'agent oxydant en excès étant dosé en retour par du sel de Mohr.

Les constituants majeurs du sédiment : SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , TiO_2 , K_2O , Na_2O et P_2O_5 sont dosés en spectrométrie de fluorescence X. La perte au feu est déterminée par pesée après calcination (1 heure à 1000°C).

Les dosages des oligo-éléments sont réalisés en spectrométrie de fluorescence X sur échantillon brut préalablement séché et broyé.

Le cadmium a été dosé par spectrophotométrie d'absorption atomique sans flamme. Les échantillons ont subi les traitements suivants :

- Lyophilisation, puis broyage soit à la main en mortier d'agate, soit à la pulvérisette, soit au mélangeur planétaire.

- Attaque : en bombe gainée de téflon "Parr" ou "Mécabar" de 25 ml. 500 mg d'échantillon + 0,75 ml H_2O + 2 ml HCl + 5 ml HNO_3 . Chauffage pendant deux heures à 110°C , mise en fiole à 50 ml (après centrifugation et filtration) stockage en flacon de polyéthylène au réfrigérateur.

CHAPITRE 4 ETUDE DE L'ESTUAIRE

4.1 - UTILISATION DES MOLLUSQUES COMME INDICATEURS QUANTITATIFS DE LA CONTAMINATION PAR LE CADMIUM

4.1.1 - REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES TENEURS EN CADMIUM DES HUITRES

Trois faits marquants ressortent de l'examen des concentrations en cadmium observées dans les mollusques des gisements de la Gironde (t. 7), il s'agit :

- a) de leur caractère particulièrement élevé ;
- b) de l'existence d'un gradient décroissant amont-aval ;
- c) d'une nette dyssymétrie entre les rives gauche et droite.

a) Le niveau très élevé des concentrations a déjà été observé sur les échantillons du R.N.O., et est en fait propre à tous les gisements prospectés (f. 4).

Ainsi, des teneurs en cadmium de 105 $\mu\text{g/g}$ de matière sèche ont été observées à Royan et à Saint-Georges-de-Didonne (4 octobre 1982). Les huîtres prélevées à Talmont le même jour contenaient 150 μg de cadmium par gramme de matière sèche, alors qu'un échantillon prélevé le 23 septembre 1982 à Dau atteignait 228 $\mu\text{g/g}$.

Les huîtres des autres régions du littoral français présentaient des teneurs beaucoup plus faibles. Par exemple, les moyennes de concentration en cadmium des huîtres de Brest et d'Arcachon s'élevaient en 1982 à 1,9 et 2,5 $\mu\text{g/g}$ de matière sèche. La figure 1 situe les ordres de grandeur des huîtres du littoral analysées en 1979 dans le cadre du R.N.O. Cette situation s'est trouvée confirmée par les campagnes réalisées au cours des années suivantes (Thibaud et Boutier, sous presse).

D'autre part, les prélèvements simultanés d'huîtres et de moules faits à La Chambrette et à Cabiroux montrent que tout en accumulant trois fois moins que les huîtres (t. 8) les moules de ces stations présentent des concentrations en métaux très supérieures à celles qui ont été observées dans les moules d'autres estuaires français (t. 9).

Ceci établit clairement l'importance du problème posé par le cadmium en Gironde.

b) Existence d'un gradient de concentration décroissant de l'amont vers l'aval

Les concentrations passent de 150 à 50 microgrammes par gramme de matière sèche entre Talmont et Bonne Anse (rive droite).

La diminution des teneurs en cadmium dans les mollusques le long d'une radiale amont - aval a déjà été observée. Frazier (1979) a constaté que les concentrations de cadmium des huîtres de la rivière Rappahannock étaient presque divisées par trois entre les stations amont et aval. Deux facteurs principaux peuvent provoquer ce phénomène.

- + La diminution effective des quantités de cadmium biodisponible dans le sens amont-aval. Si l'on suppose que l'apport se trouve en amont, on explique très simplement le gradient de concentration observé chez les huîtres par la dilution progressive de l'apport dans l'eau de mer.
- + L'activation de l'accumulation en milieu dessalé. George et al. (1977) observent in vitro que l'allure d'accumulation du cadmium par les branchies de la moule double quand la salinité passe de 33 à 17 ‰. Cette modification semble liée à la baisse d'osmolarité plutôt qu'à la baisse de salinité proprement dite. Selon Wright, cité par Mohlenberg et Jensen (1980), la baisse de salinité entraînerait un surcroît d'activité compensateur des mécanismes d'absorption des ions essentiels. Le cadmium serait ainsi absorbé en même temps que le calcium dont il est un compétiteur.

Des dessalures importantes peuvent se produire au niveau des sites prospectés, notamment pendant les crues. Leur effet s'ajoute sans doute à celui de la dilution de l'apport pour engendrer le gradient observé, mais elles ne peuvent expliquer seules les très fortes concentrations mesurées dans les huîtres.

c) Localisation des teneurs les plus fortes sur la rive droite

On a relevé 228 µg/g à Dau le 29 mars 1982. Par ailleurs, la moyenne des concentrations mesurées entre Vallières et Talmont (120 µg/g) est supérieure à celle qu'on peut observer sur la rive gauche (103 µg/g).

Cette répartition des teneurs peut s'expliquer par le schéma de circulation générale des masses d'eaux dans l'estuaire proposé par Allen et al. (1976). Selon ces auteurs, c'est par le chenal nord de la Gironde que s'évacuent préférentiellement les eaux continentales, alors que pendant le flot la passe sud constitue la voie d'entrée principale des eaux marines dans le système estuarien. La rive gauche se trouverait ainsi moins exposée aux apports continentaux, plus riches en cadmium.

4.1.2.- ASPECT CINÉTIQUE

a) Résultats

Que ce soit en été ou en hiver (t.10; f.8), les concentrations en cadmium des huîtres d'Arcachon implantées en Gironde atteignent en quelques mois des niveaux bien supérieurs à ceux qu'elles présentaient au début de l'expérience. Une certaine différence entre les deux rives, difficile à expliquer, apparaît à la suite de l'expérience de l'été ; en hiver, par contre, les cinétiques de contamination sont rigoureusement parallèles sur les deux stations.

Une différence nette s'établit entre les résultats obtenus à la suite de l'implantation d'été et ceux qui proviennent des huîtres implantées en hiver.

Tout d'abord, les niveaux atteints en fin d'expérience, soit après six mois d'implantation, sont très différents ; les concentrations originelles sont multipliées par 10 et 20 dans le cas de l'implantation estivale et atteignent pratiquement en 6 mois les niveaux que l'on obtient dans le cadre du Réseau National d'Observation (t.11).

En hiver, par contre, la vitesse de contamination est plus modérée, et après six mois, les teneurs en cadmium des huîtres atteignent des niveaux nettement plus bas qu'en été (20 µg/g au lieu de 40 et 80).

Par ailleurs, les formes des deux courbes d'accumulation ne sont pas identiques. Alors qu'en hiver les points représentant les concentrations en cadmium dans les huîtres en fonction du temps sont parfaitement alignés, il semble qu'en été la courbe de contamination prenne une allure moins régulière. Ainsi, à La Fosse, les concentrations en cadmium des huîtres passent de 29,5 à 71,8 µg/g entre le 11 juillet et le 10 août. Ce phénomène intervient également quoique de façon moins nette à Dau.

b) Discussion

+ *Niveaux atteints en fin d'expérimentation*

Les résultats obtenus permettent tout d'abord d'écarter l'hypothèse selon laquelle les huîtres originaires de Gironde auraient pu développer une aptitude particulière à concentrer le cadmium. Il apparaît en effet à l'issue de ce travail que des huîtres en provenance d'Arcachon implantées en Gironde atteignent en six mois les teneurs observées dans le cadre du R.N.O. sur les organismes autochtones.

D'autres facteurs restent susceptibles de jouer un rôle dans l'accumulation du cadmium par les huîtres en Gironde.

. La spéciation du cadmium dissous peut jouer un rôle dans sa biodisponibilité ; selon Engel et Fowler (1979), les chlorocomplexes du

cadmium sont moins absorbés que les formes libres. Selon George et Coombs (1977), les complexes organiques présenteraient une biodisponibilité supérieure à celle des formes minérales. L'éventualité d'un phénomène de complexation par la matière organique en Gironde ne peut évidemment pas être exclue à priori, mais reste hypothétique. En tout état de cause, ce phénomène ne saurait expliquer à lui seul les très fortes concentrations observées dans les huîtres.

. La salinité, en modifiant les équilibres osmotiques peut avoir une influence sur l'absorption ionique des Lamellibranches. Cependant, Frazier (1979) constate que chez C. Virginica les variations de salinité interviennent pour un facteur 3. Ce facteur n'est donc pas susceptible d'expliquer les fortes teneurs observées dans les huîtres de Gironde.

. La température peut également être invoquée pour expliquer les variations des concentrations en cadmium chez les mollusques, puisqu'elle provoque une augmentation générale du métabolisme et favorise ainsi l'absorption du cadmium (Frazier, 1979). Il est toutefois peu probable que l'influence de ce facteur, par ailleurs contestée (Cossa, 1987), puisse expliquer les niveaux atteints en Gironde.

. La présence effective de fortes concentrations en cadmium dans le milieu reste évidemment le facteur principal d'explication des teneurs observées dans les huîtres. Borchardt (1983, 1985) a montré que chez la moule, voie principale de contamination par le cadmium était celle du dissous. D'autres études (Jackim et al., 1977 ; Hardy et al., 1981) parviennent à des conclusions semblables sur d'autres Lamellibranches. Kerfoot et Jacobs (1976) ont montré que la nourriture n'était pas le vecteur principal de la contamination des huîtres par le cadmium. Ces résultats sont confirmés par l'existence de modèles relativement précis qui relient les concentrations en cadmium dans l'eau à celle des moules, sans faire intervenir les teneurs en cadmium particulaire (Talbot, 1985 ; Cossa, 1987).

Les fortes teneurs en cadmium observées dans les huîtres de Gironde peuvent donc être interprétées comme le reflet de la présence permanente de fortes concentrations en cadmium dissous dans les zones d'implantation, les autres paramètres cités précédemment pouvant intervenir pour partie dans les variations de ces fortes teneurs.

+ Différences entre la cinétique estivale et la cinétique hivernale

Deux facteurs peuvent expliquer les différences observées entre les deux courbes de contamination.

. Une augmentation des teneurs en cadmium dissous au niveau des sites d'implantation en été. Ce phénomène apparaît peu probable dans la mesure où il n'a pas été observé lors des campagnes CAGIMA et INTERSITE.

. Les écarts thermiques entre l'été et l'hiver.

Le système estuarien de la Gironde est soumis à des apports importants d'eau douce froide en hiver, ce qui renforce les écarts thermiques saisonniers. L'influence de la température sur l'accumulation des métaux par les mollusques peut intervenir à différents niveaux en contrôlant les principaux cycles biologiques auxquels sont liés la composition chimique moyenne et le poids des individus.

Ainsi, le taux de filtration, très faible en eau froide, augmente rapidement quand le milieu se réchauffe, ce qui peut contribuer à augmenter l'absorption des éléments dissous dans le milieu.

La température joue également un rôle essentiel dans le cycle reproducteur des mollusques. Or, de nombreux travaux (Cossa *et al.*, 1980 ; Frazier, 1979) ont montré que les variations simultanées de poids et de composition corporelle liées à la reproduction pouvaient provoquer des modifications brusques et importantes des teneurs en métaux chez les bivalves.

Il est donc vraisemblable que ce paramètre, dont les variations sont importantes en Gironde puisse expliquer en grande partie les différences observées entre les courbes de contamination d'hiver et d'été.

4.1.3.- SYNTHÈSE

Le travail effectué sur les huîtres a permis de cerner plus précisément le problème qui avait été mis en évidence grâce au R.N.O. A l'issue de l'étude de la répartition géographique des teneurs en cadmium des huîtres, la Gironde apparaît clairement comme une source importante de cadmium pour le littoral.

L'expérience d'implantation d'huîtres-test vient confirmer la réalité de ce problème et la continuité dans le temps de l'apport, même si la cinétique de contamination des huîtres apparaît fortement dépendante de processus saisonniers essentiellement liés à la nature biologique de notre indicateur.

Dès lors, une connaissance plus profonde du comportement du cadmium dans l'estuaire ne peut être acquise que par l'étude directe des différentes phases en présence.

4.2.- ÉTUDE DE LA PHASE DISSOUE ET DES SOLIDES

4.2.1.- RESULTATS DES CAMPAGNES

a) Colonne d'eau

Les campagnes CAGIMA I, CAGIMA II et INTERSITE III ont fourni un ensemble de résultats très concordants rassemblés respectivement sur les tableaux 12, 13 et 14.

+ CAGIMA I (26 juin-3 juillet 1984)

Cette campagne s'est déroulée en période de débit moyen, ce qui explique la faiblesse de la remontée saline dans l'estuaire (f. 9). La salinité n'est plus que de 2,5 ‰ en surface à la station 38, au PK 67. La répartition des teneurs en matières en suspension vient confirmer cette observation. En effet, de 27 mg/l à l'embouchure, elles passent brutalement à 254 mg/l à la station 37, soit au PK 85 pour garder un niveau très élevé jusqu'à la station 40, soit au PK 35 (f.10). La valeur plus faible observée à la station 41, (PK 15) permet de supposer que le bouchon vaseux se trouve en aval de ce point.

Les teneurs en carbone organique particulaire sont relativement faibles (< 1 %) ce qui traduit la nature essentiellement inorganique des matières en suspension de la Gironde. On peut attribuer à une influence marine la légère augmentation de la composante organique observée à l'embouchure.

La concentration en cadmium dissous (f.11) est très élevée dans la partie aval de l'estuaire (380 ng/l à la station 37, PK 85). Elle décroît progressivement vers l'amont jusqu'à la station 41 (PK 15). Cette tendance cesse au niveau de Bordeaux.

+ CAGIMA II (20 février - 5 mars 1985).

Cette campagne devait nous fournir des données de crue. Elle s'est en fait déroulée en conditions de "forts débits".

- Salinité (f. 12)

La salinité observée au point fixe (PK 69) varie entre 1,6 et 7 pour mille ; elle est de 0,4 pour mille au PK 45 (St 39) et tombe à 0,19 au Bec d'Ambès. Cette situation est finalement assez comparable à celle qui était établie lors de la campagne CAGIMA I ; en effet, on avait alors observé une salinité de 2,5 pour mille au PK 67 et des valeurs proches de 0, 2 pour mille à partir du PK 45. Ceci montre que nous avons à chaque fois travaillé dans des conditions qui n'étaient pas vraiment caractéristiques de crue ou d'étiage. Notons à titre de comparaison qu'aux mêmes niveaux de l'estuaire (PK 43) Jouanneau (1982) observe 2,6 pour mille en étiage et 0, 06 pour mille en période de crue bien marquée.

- Matières en suspension (f. 13)

La charge en matières en suspension est de 57 mg/l à la pointe de Grave et de 42 mg/l au Verdon. Elle atteint de fortes valeurs au point fixe (entre 100 et 500 mg/l) puis décroît régulièrement vers l'amont, puisqu'on observe encore 161 mg/l au bec d'Ambès.

Les valeurs maximales au point fixe sont observées au jusant, ce qui suggère que le bouchon vaseux se trouve à l'amont du PK 69.

- Les teneurs en cadmium dissous (f.14) passent de 50 ng/l à l'embouchure à un maximum de 310 ng/l dans la zone de turbidité maximum,

puis décroissent vers l'amont. Une chute importante est observée à la station 45 (51 ng/l) puis la concentration remonte au bec d'Ambès.

- Les teneurs en cadmium particulaire (f.15) décroissent nettement de l'amont (4,6 mg.kg⁻¹ au bec d'Ambès) vers l'aval (0,6 mg.kg⁻¹ au Verdon).

+ *INTERSITE III (30 août - 12 septembre 1985).*

Cette campagne s'est déroulée en période d'étiage bien établi comme en témoignent la remontée saline (2‰ au bec d'Ambès (f.16)) et la position très amont du bouchon vaseux (f. 17). Nous avons observé une turbidité de 1.000 NTU à Langoiran.

Dans la partie fluviale de l'estuaire (eau douce) les teneurs en cadmium dissous sont basses (\approx 20 ng/l). A cette époque, les apports sous forme dissoute doivent donc être considérés comme très faibles (f.18).

Une légère augmentation des teneurs est observée au niveau de Bordeaux ; elle peut être interprétée comme un apport de l'agglomération bordelaise ou comme un indice de désorption puisque le maximum de turbidité est situé légèrement en amont.

Les concentrations en cadmium dissous chutent nettement au niveau du bec d'Ambès, peut être en liaison avec le mélange Garonne-Dordogne. Nous n'avons pas ici les données nécessaires à la vérification de cette hypothèse. Au point fixe (PK 55) on assiste à une très nette remontée de la concentration en cadmium dissous. Les valeurs atteintes deviennent très importantes au niveau des stations 57 à 63 (420 ng/l) bien que ces stations soient situées légèrement à l'aval du bouchon vaseux.

La teneur en cadmium des suspensions prélevées à Langon est faible (0,6 mg/kg).

Plus en aval, au niveau du bec d'Ambès, les concentrations sont sensiblement plus élevées et décroissent nettement vers l'embouchure (f. 19).

b) Etude des sédiments de l'estuaire

Trois carottes ont été prélevées au Verdon, à Talmont et à La Coubre (f. 6).

+ *Description générale*

- Carotte du Verdon (f. 20)

Longueur 1 m. Les quarante cinq premiers centimètres sont constitués de vase plastique homogène (couche oxydée de 4 cm). A partir du niveau 45 cm des intercalations silto-sableuses sont fréquentes et ceci jusqu'à la base.

- Carotte de Talmont (f. 21)

Longueur de la carotte 1,10 m - Les cinq premiers centimètres sont oxydés, puis vase plastique noire, à 25 cm niveau silto-vaseux bien marqué. En deça : vase plastique.

- Carotte de La Coubre (f. 22)

Longueur de la carotte 1,28 m. Vase silto-argileuse homogène. Les trois premiers centimètres sont oxydés.

+ *Etude sédimentologique, géochimique et lithologique*

- Granulométrie

Dans l'ensemble des sites, les sédiments sont essentiellement silto-argileux. Une bonne homogénéité verticale caractérise plus particulièrement le site de La Coubre alors qu'au Verdon et à Talmont il existe des laminations sablo-silteuses plus fréquentes.

- Teneur en CaCO_3

C'est dans le site le plus aval que les teneurs sont les plus élevées. Les teneurs en carbonates sont homogènes sur la verticale à l'exception de Talmont où en dessous de 55 cm les teneurs en CaCO_3 sont en moyenne de 2 à 3 % plus faibles que dans la partie supérieure, ces valeurs basses semblent caractéristiques d'une sédimentation exclusivement terrigène (indépendamment des corrections qui peuvent être apportées par la granulométrie).

On retiendra cependant que dans tous les cas la valeur relativement faible des teneurs en CaCO_3 et l'homogénéité verticale de ces teneurs ne peut être un facteur déterminant dans les variations verticales des teneurs en métaux traces des sédiments analysés.

- C.O.P.

Dans l'ensemble les teneurs en C.O.P. des sédiments carottés sont, dans l'estuaire de la Gironde, conformes à celles mesurées dans les sédiments du bas-estuaire, et dans tous les cas pratiquement de moitié plus basses que celles des matières en suspension du bouchon vaseux estuarien (Etcheber, 1983).

- Eléments majeurs

Les niveaux plus grossiers sont effectivement plus riches en SiO_2 et plus pauvres en Al_2O_3 que les autres.

Le manganèse décroît très rapidement au-delà des premiers centimètres supérieurs de la couche oxydée.

TiO₂ toujours inférieur à 1 % est également corrélé à Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO et se situe donc bien dans la fraction fine du sédiment.

A la base de la colonne sédimentaire de la carotte de Talmont, quelques différences significatives apparaissent, traduisant des conditions de dépôt (origine des apports, milieu de dépôt) légèrement différentes des conditions actuelles.

C'est ainsi que MgO, TiO₂, K₂O sont plus élevés et que CaO P₂O₅ sont plus bas que dans la partie supérieure de la colonne sédimentaire.

- Eléments traces

Seuls Zn, Pb et Cu sont représentés dans les figures; pour ce qui est des autres éléments dosés (Ni, Zr, Rb, Sr, S, Cr, Co, Ga) on se reportera au rapport Jouanneau et al. (1985). On retiendra cependant, sur la distribution des éléments traces dans ces carottes, les enseignements suivants :

- . le zinc, le plomb et dans une moindre mesure le chrome (à Oléron) présentent un gradient de décroissance verticale significatif.
- . les teneurs en Zn, Pb, Cu, Cr et Co les plus fortes se rencontrent dans les carottes de la Gironde. De ces trois sites, ce sont les plus en amont, le Verdon et Talmont (partie supérieure de la carotte), qui enregistrent les valeurs les plus fortes.
- . les teneurs en Ni sont quasiment identiques dans les quatre sites. Les éléments Zr, Rb, Sr et Ga varient en fonction de la granulométrie de la lithologie et de la minéralogie.

- Teneurs en cadmium

Les dosages du cadmium dans les carottes sont présentés dans les tableaux 15 à 17.

On remarque une décroissance très nette des teneurs en Cd depuis la surface jusqu'à 30 cm puis à la base de la carotte de nouveau une valeur relativement élevée (> 1100 µg/kg).

Les teneurs mesurées en surface sont environ deux fois plus fortes que celles reconnues dans les MES dans cette zone de l'estuaire (0,5 à 1 µg/kg).

On observe un gradient de décroissance très net entre les niveaux de surface et la base de la carotte de Talmont, les teneurs diminuant d'un facteur 9 environ. On notera que les teneurs en Cd mesurées dans les niveaux supérieurs de cette carotte sont du même ordre que celles mesurées dans les niveaux équivalents de la carotte du Verdon soit environ 1500 µg/kg. C'est

essentiellement en dessous de 30 cm que les teneurs en cadmium décroissent nettement.

Bien que la valeur la plus forte de la carotte de la Coubre soit mesurée dans le niveau 15-20 cm, il semble qu'il existe un gradient de décroissance des teneurs de la surface vers la base. On remarquera toutefois que :

- . les teneurs en cadmium dans les niveaux supérieurs de cette carotte sont de près de moitié inférieures à celles mesurées dans les niveaux de surface au Verdon et à Talmont.
- . les teneurs mesurées à la base de la carotte sont quant à elles plus basses d'un facteur 2 seulement par rapport à celles de surface, elles restent cependant très nettement supérieures à celles mesurées dans les niveaux inférieurs à Talmont.

+ Age des dépôts carottés

- Données historiques et sédimentologiques

Dans l'anse du Verdon, les travaux de Sagouis (1976) ont permis d'aboutir à une estimation des taux de sédimentation à partir de comparaisons de cartes topographiques et bathymétriques anciennes et récentes et de l'étude des sédiments de la zone. Cet auteur s'appuyant sur une densité estimée des vases de 1,5 avance que la sédimentation est de l'ordre de 1 m en 70 ans ce qui correspondrait à un taux de sédimentation de l'ordre de 1,4 cm/an dans la zone considérée.

Dans l'anse de Talmont et d'une manière plus générale en ce qui concerne les zones intertidales de la rive droite du bas-estuaire il n'y a pas eu de travaux spécifiques qui permettent d'avancer des valeurs précises; néanmoins, Allen (1972), dans son étude générale de l'estuaire, estime que la sédimentation sur la slikke de Talmont serait de l'ordre de 1 cm/an.

Dans l'anse de La Coubre (baie de Bonne Anse), les données historiques sont beaucoup plus précises. On sait en effet de manière irréfutable (Volmat, 1953; Allen, 1972; Jouanneau, 1974) que la flèche littorale n'a commencé à se développer que vers 1900 et que ce n'est qu'à partir de 1920 que son extension fut suffisante pour qu'une baie fût individualisée à l'abri de celle-ci. Ce n'est donc au maximum que vers 1920 que les premiers dépôts vaseux ont pu s'effectuer dans Bonne Anse. La sédimentation vaseuse y est donc âgée au maximum de 65 ans.

- Données de la Radiochronologie

Le radioélément utilisé a été le ^{210}Pb ($T = 22,3$ ans), les datations ont été réalisées grâce à l'obligeance de MM. Romana (IFREMER - Toulon), Badie (CEA - Toulon) et Baron (CEA - Cherbourg).

Cette technique de datation a été utilisée en deux sites seulement : celui du Verdon où les teneurs en cadmium les plus élevées ont été rencontrées et celui de La Coubre où les données historiques sont les plus précises.

Dans les niveaux échantillonnés les résultats suivants ont été obtenus :

- Le Verdon -		- La Coubre -	
Niveau (cm)	Age (an)	Niveau (cm)	Age (an)
0- 5	0,85	0- 5	1,09
5- 10	2,55	5-10	3,28
15- 20	5,95	15-20	7,64
50- 55	17,86	50-55	22,93
100-105	34,86	85-90	38,21

ce qui a permis, à partir de l'équation reliant l'activité du ^{210}Pb en excès à la profondeur, de déterminer les taux de sédimentation suivants :

au Verdon : $v = 2,29$ cm./an
à La Coubre : $v = 2,94$ cm./an

Ces taux de sédimentation semblent en accord avec les données historiques et sédimentologiques et amènent à considérer que tant au Verdon qu'à La Coubre la colonne sédimentaire carottée n'excède pas 45 ans et que par ailleurs l'augmentation significative du cadmium dans les sédiments date au plus de 30 à 40 ans.

On notera également que :

- . cette augmentation des teneurs en cadmium est parallèle à une augmentation en zinc ;
- . cette augmentation des teneurs n'est pas liée à une quelconque modification ou variation significative du contexte granulométrique ou minéralogique des sédiments carottés ;
- . on observe une décroissance des teneurs en cadmium de l'amont vers l'aval dans la Gironde et de la Gironde vers la baie de Marennes-Oléron ;
- . "le bruit de fond géochimique" qui correspondrait donc aux teneurs en cadmium "naturel" tel qu'il était apporté dans les sédiments

estuariens et littoraux avant 1940 serait, d'après les valeurs mesurées à la base de la carotte de Talmont et d'Oléron, d'environ $250 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

4.2.2.- BILAN GEOCHIMIQUE

Le calcul du bilan géochimique du système estuarien permet d'évaluer les flux métalliques transitant dans l'estuaire et exportés vers l'océan sous forme dissoute et particulaire. De plus, en réalisant la synthèse des données hydrodynamiques et géochimiques, il permet d'avoir une représentation globale du comportement du cadmium dans l'estuaire.

a) Données hydrologiques et débits solides

Elles concernent une année moyenne établie sur 10 ans. La variation du stock de suspensions estuariennes est donc considérée comme nulle.

+ *Matières en suspension*

Apports de la Dordogne	0.7 x 10 ⁹ kg
Apports de la Garonne	1.5 x 10 ⁹ kg
Sédimentation en Gironde	1.2 x 10 ⁹ kg
Expulsions	1 x 10 ⁹ kg

+ *Eau*

Apports de la Dordogne	10.2 x 10 ¹² l
Apports de la Garonne	13.6 x 10 ¹² l

Les études que nous avons menées nous ont conduit à considérer que les concentrations dans l'eau, et dans la matière en suspension, dépendaient des débits, au moins en ce qui concerne la Garonne. Nous avons donc cherché à évaluer la proportion d'eau douce apportée au système en période de forts débits de Garonne. Jouanneau (1982) donne la répartition moyenne des débits en fonction du temps pour la Garonne (f.23). Considérons comme période de forts débits les mois de décembre à avril inclus. La figure 23 montre que l'on peut estimer que 50 % environ des apports de la Garonne interviennent dans ces conditions. Nous tiendrons compte de cette répartition pour le calcul des apports dissous.

b) Concentrations en cadmium

+ *Concentration en cadmium dissous*

Nous avons adopté les valeurs de 20 ng/l en faible débit et 250 ng/l en forts débits pour la Garonne (t.18). L'augmentation observée en période de forts débits peut être attribuée au lessivage des zones d'apport

par les pluies et aux échanges entre la phase dissoute et les particules plus chargées venues de l'amont.

En Dordogne, la concentration de 10 ng/l que nous avons observée est en accord avec la valeur inférieure à 20 ng/l déjà citée par Elbaz-Poulichet et al. (1987). Nous l'avons donc adoptée comme base de calcul.

+ Concentration en cadmium dans les matières en suspension

La majorité des apports en matières en suspension se fait en période de forts débits. Donard (1983) trouve des concentrations de cadmium particulaire comprises entre 8 et 20 mg/kg à la Réole. Nous avons nous-même mesuré des teneurs comprises entre 20 et 30 mg/kg à Cadillac en période de crue (avril 1986 - mars 1988). Il nous paraît donc raisonnable d'adopter la valeur moyenne de 15 mg/kg pour le particulaire apporté en période de crue par la Garonne.

En ce qui concerne le particulaire de la Dordogne, nous disposons d'une valeur de 1.1 µg/g obtenue en février 1988. Cette valeur est cohérente avec la teneur de 0.8 µg/g observée dans le sédiment de cette rivière. Nous avons donc adopté pour le bilan la teneur moyenne de 1µg/g.

+ Concentration en cadmium des sédiments de l'estuaire

Jouanneau et al. (1986) attribuent une concentration de 1 mg/kg aux sédiments superficiels de la Gironde. Nous avons retrouvé ces ordres de grandeur dans les horizons superficiels des carottes (chap.4, par.2.1.2).

c) Calcul du Bilan

+ Apports à l'estuaire

Particulaire :

Garonne	$15 \times 1.5 \times 10^9 = 22.5 \cdot 10^9$ mg	(22,5 t)
Dordogne	$1 \times 0.7 \times 10^9 = 0.7 \cdot 10^9$ mg	(0,7 t)

Dissous :

Garonne forts débits	$250 \times 13.6 \times 10^{12} \times 0.6 = 2040 \cdot 10^{12}$ ng	(2 tonnes)
----------------------	---	------------

Garonne faibles débits	$20 \times 13.6 \times 10^{12} \times 0.4 = 109 \cdot 10^{12}$ ng	(0,1 tonne)
------------------------	---	-------------

Dordogne	$10 \times 10.2 \times 10^{12} = 102 \times 10^{12}$ ng	(0,1 tonne)
----------	---	-------------

Soit un apport annuel de 25 tonnes.

+ *Sédimentation, expulsions*

- Sédimentation : $1,2 \cdot 10^6$ tonnes à 1 mg/kg

La quantité de cadmium piégée dans le sédiment estuarien est donc de 1,2 tonnes.

- Expulsion sous forme particulaire

Les campagnes CAGIMA et INTERSITE ont permis d'évaluer à 1 mg/kg au maximum la teneur en cadmium des suspensions de l'estuaire inférieur. La quantité de cadmium exportée ainsi est donc de $10^6 \times 10^{-6} = 1$ tonne.

- Expulsion sous forme dissoute

Nous avons observé au cours d'INTERSITE III un maximum de cadmium dissous pour une salinité de 18.4 ‰. Aux salinités supérieures la concentration en cadmium diminue par simple dilution par l'eau de mer (f. 24).

En supposant que ces conditions soient maintenues toute l'année, comme permet de le penser la relative stabilité des teneurs en cadmium observées en aval du bouchon vaseux lors des trois campagnes, on peut déterminer la quantité de cadmium exportée annuellement sous forme dissoute.

Nous adopterons comme références marines la salinité de 35 ‰ et la concentration en cadmium dissous de 20 ng/l.

L'eau estuarienne de salinité 18.5 ‰ contient $\frac{18.5}{35} = 53\%$ d'eau de mer.

On peut donc évaluer à environ 10 ng la quantité de cadmium amenée par l'eau de mer dans 1 litre d'eau estuarienne.

Le reste, soit 410 ng est véhiculé par l'eau douce (sans préjuger de la forme chimique ou physique de l'apport).

Le débit annuel étant $23.6 \cdot 10^{12}$ l, on évalue la quantité annuelle de cadmium exportée sous forme dissoute à :

$$\frac{23.6 \cdot 10^{12} \times 410}{0.47} = 20.7 \text{ tonnes}$$

Soit environ 21 tonnes.

Finalement, le bilan s'établit comme suit :

- somme des apports : 25 tonnes ;
- somme des retraits et expulsions : $20.7 + 1.2 + 1 = 22.9$ tonnes ;

Soit 23 tonnes.

Il apparaît un léger excédent des apports (2 tonnes), certainement bien plus faible que l'incertitude inhérente à ce type de calcul.

4.2.3.- DISCUSSION ET ENSEIGNEMENTS

Le bilan a été établi sur la base des apports du bassin versant. (f. 25) Le fait qu'il soit pratiquement équilibré montre que les apports éventuels situés au niveau de l'estuaire sont nécessairement limités en importance.

Par ailleurs, malgré cet équilibre global, on note de très fortes disparités entre les différentes formes du cadmium en entrée et sortie du système.

Ainsi, les apports à l'estuaire se font essentiellement sous forme particulaire (23 tonnes), le cadmium dissous étant nettement moins abondant.

Par contre, en sortie du système la forme dissoute est nettement dominante, puisqu'elle représente 20 tonnes/an alors que la sédimentation et les expulsions sous forme particulaire ne représentent que 2 tonnes. Il existe donc dans l'estuaire un mécanisme conduisant à la mobilisation annuelle de 20 tonnes de cadmium environ.

Ce phénomène de mobilisation du cadmium particulaire est suggéré par la forme en cloche de la courbe cadmium-salinité, située au-dessus de la droite dilution théorique (f. 24). Le maximum de concentration est atteint pour une salinité de 18,5 ‰, après quoi il y a dilution simple par l'eau de mer.

Ce comportement est courant dans les estuaires à forte turbidité et où le temps de résidence des particules est important.

Un certain nombre de mécanismes peuvent l'expliquer.

- . Certains auteurs ont évoqué la possibilité d'un phénomène de désorption physique du cadmium selon le modèle de Langmuir (O'Connor et Connolly, 1980). Un tel phénomène, quasi instantané à l'échelle de l'estuaire, donnerait lieu à un maximum de cadmium dissous au niveau du bouchon vaseux. Or, dans cette étude, nous n'avons pas observé de relation entre la turbidité et le cadmium dissous.
- . L'influence de la salinité et du pH sur les phénomènes de désorption a également été démontrée par Bourg (1983) au cours d'expérimentations in vitro et à l'aide d'une simulation mathématique. Selon cet auteur, on devrait observer un relargage de cadmium à des salinités beaucoup plus faibles que celles pour lesquelles il apparaît sur le terrain.
- . Jouanneau (1982) a formulé l'hypothèse de la solubilisation du Zn par minéralisation de la matière organique particulaire dans

le bouchon vaseux. Ce mécanisme pourrait fort bien s'appliquer au cadmium qui, comme le zinc, présente une forte affinité pour les particules organiques. De plus, on conçoit aisément que ce mécanisme, plus lent que les précédents, trouve préférentiellement son siège dans un estuaire macrotidal à forte turbidité et à temps de résidence élevé pour les particules.

- . Donard (1983) propose un modèle dans lequel les variations des conditions redox au niveau du bouchon vaseux tiennent une place privilégiée.

En fait, il est vraisemblable que tous ces mécanismes puissent intervenir à un certain moment du transit des particules dans l'estuaire ; dans ce cas, nous ne pourrions observer que leur résultante qui se traduit par un relargage de cadmium stabilisé en solution par la formation de chlorocomplexes dès que l'activité des chlorures devient suffisante.

CHAPITRE 5
L'EXTENSION AU PLATEAU CONTINENTAL ET AUX ABORDS
(CAMPAGNES CAGIMA I ET II)

5.1.- ETUDE DE L'EAU ET DES SUSPENSIONS

5.1.1.- SALINITE

Les deux campagnes ont permis de mettre en évidence la large extension de la dessalure imputable à la Gironde (f. 9 et 12).

Les prélèvements de fond réalisés lors de la campagne CAGIMA I ont permis de constater que cette influence est limitée à la couche superficielle. La dessalure ($S < 34 ‰$) qui concernait l'ensemble de la zone située au nord de la Gironde lors de CAGIMA I (été) s'étendait jusqu'à la latitude de la pointe de Chassiron et sur des fonds de moins de 35 m lors de CAGIMA II (hiver).

Au sud de la Gironde, aucune dessalure n'est observée, même sur les stations les plus proches de l'estuaire. Ceci est en accord avec le schéma de circulation des eaux en Gironde proposé par Allen (déjà cité), selon lequel l'estuaire serait alimenté en eau marine par le chenal sud alors que les eaux estuariennes seraient évacuées préférentiellement par le chenal nord.

5.1.2.- MATIERES EN SUSPENSION

Les teneurs en matières en suspension chutent assez vite en dehors de l'estuaire (f. 10, f. 13). Lors de la campagne d'été (CAGIMA I), nous n'avons pas observé d'extension du panache turbide vers le nord, ce qui permet d'attribuer à la vidange du bassin de Marennes-Oléron l'augmentation de turbidité observée au niveau du pertuis de Maumusson. L'extension du panache de turbidité est également limitée vers le large, puisque la charge en MES, qui est de 20 mg/l à La Coubre n'est plus que de 3 mg/l à 5 milles dans l'ouest de cette station (f. 10). Lors de la campagne CAGIMA II, qui a eu lieu en hiver, l'extension du panache turbide se révèle plus importante, puisque les charges en MES passent de façon continue de 27 mg/l à 4 mg/l entre La Coubre et la partie nord de l'île d'Oléron. Il n'est alors plus possible d'individualiser les différentes sources de turbidité situées sur ces portions du littoral (f. 13).

5.1.3.- TENEURS DES PARTICULES EN CARBONE ORGANIQUE ET EN CHLOROPHYLLE

Ces deux paramètres présentent une distribution semblable en nette augmentation vers le large. Les valeurs passent de 2 à 10 % pour le carbone organique particulaire et les augmentations sont aussi nettes pour la chlorophylle (f. 26 à 28).

Cette évolution peut être interprétée comme résultant du mélange de deux stocks de particules de nature différente, le stock littoral et estuarien étant essentiellement constitué de débris minéraux, alors que les particules du large seraient plutôt de nature planctonique.

La variation des teneurs en chlorophylle et en C.O.P. est très brusque au sud de l'embouchure de la Gironde, en accord avec le caractère nettement marin des eaux situées dans cette zone .

5.1.4.- CADMIUM DISSOUS

Au large, et au cours des deux campagnes CAGIMA, les concentrations de surface sont comprises entre 10 et 30 ng/l (f. 11 et 14). Ce sont les niveaux naturels habituellement rencontrés dans les eaux côtières (t. 2). A l'embouchure de la Gironde, les teneurs sont nettement plus élevées (50 ng/l à la pointe de La Coubre). Cependant, lors de la campagne CAGIMA I, l'influence des apports girondins reste limitée à une zone relativement restreinte proche de l'embouchure. A plus de 5 milles de la côte ou au nord du pertuis de Maumusson, les teneurs redeviennent normales, et ceci aussi bien au cours de CAGIMA I que de CAGIMA II.

Les teneurs en cadmium dissous observées près du fond lors de CAGIMA I sont toujours inférieures à celles de la surface, même très loin de l'embouchure (f. 12). On peut voir dans cette distribution une conséquence de l'extension superficielle des eaux de Gironde sur le plateau. Cette influence, trop ténue pour être révélée par l'examen des niveaux absolus se trouverait mise en évidence par l'étude des différences surface-fond.

La campagne INTERSITE III, plutôt centrée sur l'estuaire a quand même permis de confirmer les observations faites au cours de CAGIMA I et II en ce qui concerne le littoral, puisque l'influence de la Gironde a pu être mise en évidence jusqu'au pertuis de Maumusson (49 ng/l).

Dans la baie de Marennes-Oléron (f. 11), des indices d'apports ont été observés au niveau de la Charente (60 ng/l, CAGIMA I). Les résultats un peu plus élevés sur ce secteur au cours de la campagne d'hiver peuvent s'expliquer par des apports terrigènes plus importants et par une consommation phytoplanctonique plus réduite.

Finalement la distribution des teneurs en cadmium dissous sur le proche plateau continental peut être décrite en deux temps :

- aux abords immédiats de l'embouchure se trouve une zone directement influencée par la Gironde, où les teneurs superficielles observées sont manifestement supérieures à

celles que l'on rencontre habituellement dans les eaux côtières. Dans les conditions où nous avons travaillé (débits moyens de fin de printemps, forts débits d'hiver, débits d'étiage), cette influence ne s'étend pas au-delà du pertuis de Maumusson ; cette position limite ne permet pas d'écarter l'éventualité d'une influence girondine sur Marennes-Oléron, bien que nous ayons surtout noté des teneurs élevées au niveau de l'embouchure de la Charente.

- au large, les teneurs des eaux superficielles prennent des valeurs considérées comme "naturelles" en milieu côtier.

Toutefois, les légères distortions surface-fond observées lors de CAGIMA I semblent indiquer que l'influence de la Gironde est sensible, beaucoup plus loin que ne le laisserait penser le simple examen des teneurs absolues en surface.

5.1.5.- CADMIUM PARTICULAIRE (f. 15)

Les plus fortes valeurs sont observées dans les zones à caractère océanique marqué, c'est-à-dire à l'ouest et au sud de la zone étudiée. Ceci peut être expliqué par la nature du particulaire recueilli au large, plus riche en phytoplancton. Les résultats de chlorophylle, nettement plus élevés au large, confirment cette hypothèse. Martin et Broenkow (1975) ont déjà observé sur le terrain que le phytoplancton accumule le cadmium à des niveaux bien supérieurs à ceux du particulaire minéral.

Dans la baie de Marennes-Oléron, les teneurs en cadmium particulaire sont plus faibles. Cette diminution intervient parallèlement à celle du taux de chlorophylle observé dans les suspensions.

Entre la Gironde et l'île d'Oléron, les concentrations en cadmium particulaire augmentent progressivement vers le nord et vers le large. On peut voir dans cette évolution un signe de l'extension du particulaire girondin appauvri en cadmium au cours du transit estuarien, dont le mélange avec des particules marines présentant une affinité plus grande pour le cadmium crée un gradient particulièrement net.

5.2.- ETUDE DES SEDIMENTS DU PLATEAU ET DE LA BAIE DE MARENNES-OLERON

5.2.1 - ETUDE DES SEDIMENTS SUPERFICIELS

Une quarantaine d'échantillons de sédiments ont été prélevés lors des deux campagnes (f. 6). On peut les regrouper en deux zones :

- la zone située entre les îles (Oléron et Ré) et la côte, que nous nommerons "Bassin de Marennes-Oléron - Ré".
- la zone extérieure, que nous nommerons "plateau".

Les analyses réalisées sur ces sédiments ont été les mêmes que sur les sédiments des carottes : granulométrie, teneur en carbonates, teneur en carbone organique particulaire, analyse des éléments majeurs et traces, analyse du cadmium.

Sur les stations où le sédiment s'est révélé trop grossier pour être susceptible de retenir des oligo-éléments métalliques en quantité appréciable, seule l'analyse granulométrique a été réalisée.

a) Caractéristiques générales

+ *Granulométrie*

Les sédiments du Bassin Marennes-Oléron - Ré sont des vases contenant environ 30 % de fraction argileuse et dont la médiane se situe dans les silts fins.

+ *Teneur en CaCO_3*

Les teneurs les plus élevées (14 à 22 %) se rencontrent dans la zone vaseuse de Marennes-Oléron - Ré. Sur le plateau, les teneurs supérieures à 15 % sont liées à la présence de débris coquilliers.

+ *C.O.P.*

Les teneurs les plus élevées (supérieures à 1.25 %) se rencontrent dans les sédiments argileux proches de l'île de Ré, et dans la moitié est de la baie de Marennes-Oléron ; elles sont le plus souvent légèrement plus faibles que la teneur moyenne (1.55 %) observée par Donard (1983) dans la Gironde. Seule la teneur relevée à l'embouchure de la Charente (1.77 %) est supérieure à cette moyenne.

La moitié ouest de la baie de Marennes-Oléron présente des teneurs en C.O.P. inférieures à 1 %.

Dans les sables du plateau, les teneurs en C.O.P. sont généralement faibles. Par contre, on observe des teneurs relativement fortes dans les silts au large de la Gironde (1.02 % à la station 16 ; 0.91 % à la station 19), ainsi qu'au sud de la zone étudiée, aux stations 23 et 25 (1.21 %).

+ *Les éléments majeurs (t. 19)*

L'abondance des principaux constituants, silice et alumine est directement liée à la granulométrie. Les teneurs les plus élevées en silice sont mesurées dans les sédiments les plus grossiers (sables) et les teneurs les plus élevées en alumine le sont dans les sédiments fins (vases).

- Les teneurs en Fe_2O_3 suivent celles de l'alumine.

D'une façon générale, les teneurs en CaO sont plus élevées dans le bassin de Marennes-Oléron-Ré (supérieures à 10 %) que sur le plateau (5 à 9 %).

- Les teneurs en TiO₂ sont en général plus faibles dans le bassin de Marennes-Oléron-Ré (autour de 0.6 %) que sur le plateau (0.6 à 0.9 %), mais ne paraissent pas nettement liées à une fraction granulométrique donnée.
- Les teneurs en K₂O sont comprises entre 1.5 et 2.5 % sur le plateau. Elles sont en moyenne plus faibles dans le bassin de Marennes-Oléron-Ré, où elles varient le plus souvent entre 1.4 et 1.8 %.
- Les teneurs en Na₂O varient entre 1.2 et 3.2 % sans que ces variations apparaissent liées à un facteur donné.
- Les teneurs en P₂O₅ sont pratiquement constantes (environ 0.20 %) dans toute la zone étudiée.

b) Les éléments traces (t. 20)

Les teneurs en éléments traces ont été comparées ici à celles des matières en suspension prélevées dans la Gironde au cours de la campagne CAGIMA II.

L'examen de la répartition de ces différents constituants des sédiments amène les remarques suivantes :

- les sédiments de la Gironde sont les plus pauvres en CaO, en strontium et en soufre, ce qui peut s'interpréter comme une relative pauvreté en carbonates pour les deux premiers éléments, en matière organique pour le troisième.
- les sédiments de la baie de Marennes-Oléron, en particulier ceux de l'embouchure de la Charente, sont plus riches en oligoéléments métalliques que ceux du plateau, ceci étant particulièrement net pour le plomb et pour le zinc.
- les sédiments prélevés devant la baie de l'Aiguillon (S2) se différencient de ceux de la baie de Marennes-Oléron de plusieurs façons : faible teneur en silice, teneurs en métaux souvent un peu plus faibles, forte teneur en soufre et perte au feu importante, ces deux derniers paramètres semblant indiquer une richesse plus grande en matière organique.
- enfin, les oligo-éléments métalliques sont nettement plus abondants dans les sédiments de la Gironde que dans le reste de la zone étudiée. De plus, les matières en suspension ont dans chaque cas une teneur supérieure à celle des sédiments du fond.

c) Le cadmium

Les résultats des analyses des teneurs en cadmium dans les sédiments sont présentés sur la figure 29 et le tableau 21.

Exception faite des valeurs rencontrées dans les sédiments et les MES de la Gironde, les teneurs sont partout nettement inférieures à 1 µg/kg. On n'observe pas de différences entre les valeurs mesurées lors de la campagne estivale CAGIMA I et la campagne hivernale CAGIMA II.

Comme pour les autres métaux, les teneurs les plus élevées sont rencontrées dans les sédiments les plus fins. C'est dans le bassin de Marennes-Oléron et le pertuis Breton que les valeurs sont les plus fortes (190 à 520 µg/kg).

On notera que les valeurs les plus fortes s'observent dans l'anse de Bellevue (niveau de surface de la carotte) mais aussi au niveau de l'embouchure de la Charente (520 µg/kg), ce qui laisserait supposer que ce fleuve contribue pour une faible partie tout du moins aux apports en cadmium dans le bassin.

Sur le plateau lui-même, les teneurs en cadmium des sédiments sont très faibles (30 à 190 µg/kg), à l'exception de la station 25 (CAGIMA I) où on enregistre 310 µg/kg. D'une manière générale c'est dans les sédiments les plus fins des vasières ouest-Gironde (S 15-16, CAGIMA I) et sud-Gironde (S 15, CAGIMA I, par exemple) que les teneurs sont les plus fortes. On notera toutefois qu'elles sont comparables et souvent même inférieures à celles de sédiments rencontrés dans des zones côtières considérées comme exemptes de pollution (Dumas, 1985). Dans tous les cas, elles restent d'un facteur 5 à 10 inférieures à celles rencontrées dans les niveaux supérieurs des sites du Verdon et de Talmont.

La teneur en cadmium devant la baie de l'Aiguillon est également relativement faible.

Pour les échantillons du plateau et de Marennes-Oléron (campagne CAGIMA II), on note une assez bonne relation entre la granulométrie et la teneur en cadmium, les sédiments les plus fins étant d'une façon générale les plus riches en cadmium (f. 30). Par contre les points représentant les sédiments et MES de l'estuaire de la Gironde se situent très nettement au-dessus du nuage de points représentant les sédiments du plateau.

Ceci confirme l'hypothèse d'un enrichissement "artificiel" en cadmium des sédiments de l'estuaire, par rapport aux sédiments du plateau plus sableux, mais aussi par rapport à ceux de Marennes-Oléron, de granulométrie comparable.

5.2.2.- ETUDE DES SEDIMENTS CAROTTES (Carotte de Bellevue)

Longueur de la carotte 1.30 m. Vase silto-argileuse homogène. Les trois premiers centimètres sont oxydés.

Les résultats essentiels des analyses sédimentologiques, lithologiques et géochimiques sont présentés sur la figure 31.

a) Granulométrie

Les résultats de l'analyse granulométrique des sédiments carottés dans l'anse de Bellevue présentent des analogies très nettes avec ceux rencontrés dans la baie de Bonne Anse à La Coubre :

la fraction fine est pratiquement toujours supérieure ou égale à 80 % ;
il existe quelques niveaux où la fraction sableuse atteint environ 80 %.

On notera cependant que la fraction argileuse est légèrement plus abondante en moyenne, tout du moins dans les 90 premiers centimètres. A l'inverse, les niveaux de la base sont plus silteux et ceci se traduit dans la valeur du grain médian, qui, dans les 25 derniers centimètres se situe dans la classe des silts moyens.

b) Teneur en CaCO_3

Les teneurs en carbonates sont pratiquement constantes dans toute la colonne sédimentaire. On notera que ces valeurs sont en moyenne 4 à 5 % plus élevées qu'en Gironde.

c) C.O.P

Les teneurs en C.O.P. sont dans les niveaux sableux-argileux légèrement inférieures à 1 %. Les valeurs les plus élevées (inférieures toutefois à 2 %) se rencontrent dans des niveaux où la fraction sableuse et silteuse est relativement forte. Il s'agirait alors d'une matière organique assez grossière, mal dégradée.

d) Elements majeurs

Comme dans les trois sites de l'embouchure de la Gironde précédemment décrits ce sont là encore SiO_2 et Al_2O_3 qui sont les éléments majeurs du sédiment et, dans ce site également,^{2,3} les variations observées s'expliquent par la granulométrie.

Par rapport au "spectre" girondin, quelques petites différences apparaissent ; elles concernent :

- FeO plus bas de 1 % environ ;
- TiO_2 plus bas de 1000 à 2000 ppm ;
- Ca^{2+} plus élevé (déjà sensible par l'analyse de CaCO_3)

et dans une moindre mesure peut-être également MnO légèrement plus bas.

e) Les éléments traces

Seuls Zn, Pb et Cu ont été rapportés (f. 31). En ce qui concerne les autres éléments, on se reportera au rapport Jouanneau et al. (1985) ; on retiendra les éléments suivants.

Un léger gradient de décroissance verticale peut être signalé en ce qui concerne le zinc et le chrome. Zn Pb Cu et Co ne présentent pas de diminutions significatives avec la profondeur.

Indépendamment des variations granulométriques et lithologiques, il semble exister une augmentation du zirconium dans les niveaux inférieurs de cette carotte. En ce qui concerne Rb Sr et Ga l'homogénéité verticale est la règle générale.

f) Cadmium (t. 22)

Dans l'ensemble, les teneurs en cadmium sont beaucoup plus faibles que dans la Gironde. C'est ainsi que les valeurs en surface sont en moyenne trois fois plus faibles qu'au Verdon. On observe néanmoins dans ce site également une décroissance des teneurs de la surface vers la base de la carotte, les niveaux inférieurs présentant des teneurs (250 µg/kg) de moitié plus faibles que celles enregistrées dans le haut de la carotte.

CHAPITRE 6

ETUDE DES BASSINS DU LOT ET DU RIOU MORT

6.1.- CONDITIONS HYDROLOGIQUES

Les cours d'eau étaient en période de décrue : le débit du Riou Mort (à l'aval de Viviez) a diminué progressivement de $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$ le 27 janvier 1986 à $2.60 \text{ m}^3/\text{s}$ le 31 janvier 1986, tandis que le débit du Lot à Livinhac (quelques kilomètres en amont du confluent avec le Riou Mort) était d'environ $150 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.2.- REPARTITION DE L'ECHANTILLONNAGE (f. 7)

Des prélèvements ont été réalisés le long du Lot, depuis Coursavy (en amont du confluent avec la Dourdou) jusqu'à Saint-Géry (15 km en amont de Cahors).

Des points d'échantillonnage ont également été répartis sur tout le bassin du Riou Mort. Les points 1 (Riou Mort et un de ses affluents près du lieu-dit Tols) sont situés en amont de toute zone urbaine ou industrielle et peuvent donc servir de référence pour des teneurs "naturelles".

6.3.- TYPES DE PRELEVEMENT (f. 7)

6.3.1.- SEDIMENT

Il s'agit soit de sédiments du fond des lits des cours d'eau (vases souvent silteuses, parfois sables), soit de dépôts de berge, généralement vaseux, provenant de la crue des jours précédents.

6.3.2.- MATIERES EN SUSPENSION

Deux prélèvements de 300 l d'eau ont été réalisés par pompage dans le Lot (un en amont du Riou Mort, l'autre en aval) ; les matières en suspension qu'ils contenaient ont ensuite été recueillies par centrifugation.

6.3.3.- SOLS

Deux échantillonnages ont été effectués à la tarière, près du Riou Mort à Tols (point 3) et près du Lot à Saint-Pierre (point 11), afin de détecter une éventuelle contamination des sols situés en bordure de rivière.

6.3.4.- SUBSTRATUM

Un échantillon d'argile du Saxonien a été prélevé en amont de Firmi.

6.4.- RESULTATS

6.4.1.- ELEMENTS MAJEURS (t. 23)

Les sédiments du bassin du Riou Mort sont plus pauvres en alumine et surtout plus riches en silice que ceux prélevés le long du Lot.

Ceci peut être attribué à plusieurs causes.

Les sédiments prélevés dans le Lot sont plus fins donc plus riches en minéraux argileux et donc en alumine alors que les sédiments plus sableux du Riou Mort sont plus riches en quartz. On rappellera à cet égard que les sédiments échantillonnés dans le Lot correspondaient surtout à des dépôts de berge ou de débordement donc à des sédiments fins alors que ceux du Riou Mort ont été prélevés dans le lit du cours d'eau. On remarquera par ailleurs le caractère original du prélèvement n° 5 particulièrement riche en fer et en calcium qui correspond sans doute à un sous-produit de l'industrie locale.

6.4.2.- LE CADMIUM

a) Le cadmium particulaire (f. 32)

+ *Sédiments*

La teneur en cadmium des sédiments du Riou Mort dans sa partie amont ne témoigne pas d'un apport particulier à ce niveau de la rivière. En aval de Decazeville, on observe une augmentation des concentrations, qui ne dépassent cependant pas 4 microgrammes par gramme. Par contre, en aval de la zone de Viviez, la contamination est très forte: on relève une teneur de 51 µg/g, sans décroissance le long de la rivière; on observe même, à Saint-Géry (point 12), une teneur équivalente à celle du Riou Mort aval. Cette forte teneur ne semble pas pouvoir s'expliquer par une deuxième contamination en quantité importante dans cet affluent.

+ Matières en suspension

Le Riou Mort en aval de Viviez est très chargé en matières en suspension. La quantité de ces dernières semble d'ailleurs être très variable : lors du prélèvement réalisé en janvier la teneur est passée de 60 mg/l à 100 mg/l en l'espace de vingt minutes, la couleur de l'eau passant progressivement d'un brun clair à un brun rougeâtre assez foncé.

Les teneurs en cadmium des suspensions sont plus élevées que celles mesurées aux mêmes points dans les sédiments, aussi bien en amont qu'en aval du confluent du Lot et du Riou Mort.

L'apport du Riou Mort semble là aussi déterminant dans la mesure où dans le Lot, les teneurs en cadmium sont multipliées par vingt après la confluence avec le Riou Mort.

+ Sols

On relève également une légère contamination des sols en bordure du Lot, par rapport à ceux situés en amont du bassin du Riou Mort. Dans les deux cas, la teneur mesurée à 50 centimètres de profondeur est supérieure à celle de surface.

b) Le cadmium dissous

Des mesures ponctuelles effectuées dans les eaux du Riou Mort ont également mis en évidence un enrichissement considérable en cadmium dissous au niveau de la zone de Viviez, puisque le 1/4/86 on a mesuré 55 ng/l en amont de Viviez, 2250 ng/l dans la zone industrielle (Penchot) et 55 ng/l au niveau du confluent avec le Lot.

6.5.- ENSEIGNEMENTS

La région du Riou Mort aval et du Lot de Bouillac à Cahors peut donc être considérée comme contaminée de manière chronique par le cadmium.

La majeure partie de ce cadmium, ainsi que d'autres métaux (baryum et zinc surtout) provient de la zone industrielle de Viviez. L'origine doit vraisemblablement en être recherchée dans les effluents de la fonderie de Vieille Montagne, mais il est également possible que le lessivage d'anciens crassiers joue un rôle non négligeable dans cette contamination.

Les teneurs en cadmium dissous dans le Riou Mort et en cadmium particulaire à Bouillac sont inquiétantes et font envisager la possibilité d'une pollution encore plus marquée, pouvant conduire à des accidents graves, notamment en période d'étiage, où les débits fluviaux risquent d'être insuffisants pour diluer les effluents toxiques.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les études que nous avons réalisées ont permis d'éclaircir les aspects les plus importants de la contamination de la Gironde par le cadmium.

LES RELATIONS MILIEU-ORGANISMES

Il existe une adéquation quasi-parfaite entre les teneurs en cadmium observées dans les mollusques et les concentrations mesurées dans le milieu.

En effet, Cossa (1987) a établi entre ces deux paramètres la relation suivante : $Cd_M = 0,08 Cd_D^{1,03}$. Où Cd_M est la concentration en Cd des tissus mous de la^M moule (en^D poids sec) et Cd_D est la teneur en Cd dissous de l'eau en nanogrammes par litre.

Appliquée à la Gironde pour des teneurs comprises entre 200 et 400 ng/l, cette formule donne des concentrations corporelles comprises entre 31 et 42 µg/g de matière sèche alors que les moules prélevées sur le terrain présentent des concentrations en cadmium comprises entre 19 et 38 µg/g.

Par ailleurs, en utilisant un facteur correcteur de 3 pour tenir compte de l'effet de l'espèce, on peut constater que la fourchette de 60 à 90 µg/g obtenue contient la quasi totalité des résultats obtenus sur les huîtres dans le cadre du R.N.O.

LE ROLE DE L'ESTUAIRE DANS LA DYNAMIQUE DU CADMIUM

Nous avons mis en évidence l'existence d'un stock particulière estuarien à fort temps de résidence au cours duquel les particules chargées venues de l'amont perdent une grande partie de leur charge en cadmium, qui est expulsé vers le milieu marin sous forme dissoute. La Gironde apporterait ainsi 20 tonnes de cadmium par an à l'océan.

Le bilan géochimique est équilibré sans qu'il soit fait appel à une source anthropique au niveau de l'estuaire. Nous pouvons donc considérer que si une telle source existait, elle serait suffisamment faible pour ne pas avoir été détectée dans le cadre de ce travail.

L'ORIGINE DU CADMIUM

L'étude des carottes prélevées dans l'estuaire a montré que l'enrichissement en cadmium datait de quelques dizaines d'années seulement. La soudaineté de ce phénomène inciterait à lui attribuer une origine humaine.

Les investigations menées dans le bassin versant ont conduit à l'identification d'une source importante de nature industrielle située dans la région de Viviez.

LES RELATIONS ESTUAIRE-PLATEAU CONTINENTAL

L'influence de la Gironde sur le plateau continental est faiblement perçue, tant au niveau du particulaire que du dissous. Toutefois, les concentrations en cadmium mesurées au niveau du pertuis de Maumusson ne permettent pas d'exclure l'éventualité d'une influence girondine sur le bassin de Marennes-Oléron.

*

* *

- Il ressort en premier lieu de cette étude que les mollusques ont parfaitement joué le rôle d'indicateur quantitatif de contamination pour lequel ils sont utilisés dans le cadre du réseau national d'observation de la qualité du milieu marin.

Le maintien de ce type de surveillance en Gironde est donc vivement recommandé.

- Cette étude a montré qu'il existait à l'échelle d'un bassin versant tout entier un problème de contamination chronique par une activité humaine.

La zone industrielle de la Vieille Montagne a produit une quantité énorme de déchets (boues cadmiées) dont le stockage sur place constitue une menace permanente pour la qualité des eaux superficielles. Il importe au plus haut point d'entreprendre une évaluation de la charge en cadmium présente dans ces boues ainsi que dans les sédiments fortement contaminés du Riou Mort et du Lot, qui continueront pendant longtemps à relarguer le cadmium dont ils sont chargés, malgré l'arrêt des activités les plus polluantes de l'usine de la Vieille Montagne en 1987.

- Nous avons également montré que l'augmentation des teneurs en cadmium dissous provoquée par la Gironde pouvait s'étendre jusqu'au pertuis de Maumusson. Ceci ne permet pas d'écarter une éventuelle responsabilité des apports girondins dans les teneurs en cadmium relativement élevées

observées dans les huîtres de Marennes-Oléron ; c'est pourquoi, nous recommandons qu'une étude des transferts éventuels de cadmium entre la Gironde et le bassin soit réalisée.

- Les apports de cadmium par la Gironde s'étant révélés très importants, il nous paraît essentiel de poursuivre leur évaluation et de l'affiner, afin de mettre en évidence les effets des mesures qui pourraient être prises au niveau des sources.

- Enfin, les hypothèses que nous avons formulées quant aux mécanismes aboutissant à la situation observée en Gironde demandent à être étayées et approfondies. Des campagnes destinées à étudier les liaisons entre le cadmium et les particules en fonction des conditions physicochimiques contribueraient efficacement à cette approche.

* * * * *

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN (G.P.), 1972.- Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Université de Bordeaux I. n° 369, 310 p.
- ALLEN (G.P.), SAUZAY (G.), CASTAING (P.) et JOUANNEAU (J.M.), 1976.- Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde estuary, France. In : Estuarine processes, Wiley edit. Academic Press.
- AMINOT (A.) et CHAUSSEPIED (M.), 1983.- Manuel des analyses chimiques en milieu marin. CNEXO.
- ANONYME, 1988.- Europe environnement n° 292 p. 8. Bulletin d'information publié par Europe Information Service - 46, avenue Elisabeth - Bruxelles.
- BALLS (P.N.), 1985.- Copper Lead and Cadmium in coastal waters of the western North Sea. Marine Chemistry, 15 : 363-378.
- BERMAN (S.S.), MYKYTIUK (A.P.), YEATS (P.A.), et BEWERS (J.M.), 1986.- ICES 5 th round intercalibration for trace metals in sea water. Cooperative Research Report n° 136. Conseil International pour l'Exploration de la Mer, Copenhague.
- BORCHARDT (T.), 1983.- Influence of food quantity on the kinetics of cadmium uptake and loss via food and sea-water in *Mytilus edulis*. Marine Biology, 76 : 67-76.
- BORCHARDT (T.), 1985.- Relationships between carbon and cadmium uptake by *Mytilus edulis*. Marine Biology, 85 : 233-244.
- BOURG (A.), 1983.- Modélisation du comportement des métaux traces à l'interface solide - liquide dans les systèmes aquatiques. Documents du BRGM, N° 62 - 1983.
- BOUTIER (B.), 1981.- Synthèse des résultats de la surveillance des micro-polluants dans la matière vivante. Bulletin du RNO n° 17. Ministère de l'Environnement.

- BOYLE (E.A.), HUESTED (S.S.), et GRANT (B.), 1982.- The chemical balance of the Amazone plume. II Copper, Nickel and Cadmium. Deep Sea Research, 29 : 1355-1364.
- BOYLE (E.A.), SCLATER (F.), et EDMOND (J..M.), 1976.- On the marine geochemistry of cadmium. Nature. London. 263 : 42-44.
- BRULAND (K.W.) et FRANKS (R.P.), 1983.- Mn, Ni, Cu, Zn, Ni and Cd in the western North Atlantic. In : Trace metals in sea water. C.S. WONG et al. Eds. Plenum press, New-York.
- CASTAING (P.), 1981.- Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes. Cas de la Gironde. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Université de Bordeaux I. n° 701. 530 p., 179 Fig., 14 Tab..
- COSSA (D.), BOURGET (E.), POULIOT (D.), PIUZE (J), et CHANUT (JP.), 1980.- Géographical and seasonal variations in the relationship between trace metal content and body weight in *Mytilus edulis*. Marine Biology, 58, 7-14.
- COSSA (D.) et LASSUS (P.), 1989.- Le cadmium en milieu marin : biogéochimie et écotoxicologie. Rapports Scientifiques et Techniques de l'IFREMER 16. 112 p.
- COSSA (D.), 1987.- Le cadmium et le mercure en milieu côtier, biogéochimie et utilisation du genre *Mytilus* comme indicateur quantitatif. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Université Pierre et Marie Curie (Paris VI).
- DANIELSSON (L.G.) et WESTERLUND (S.), 1984.- Short term variations in trace metals concentrations in the Baltic. Marine chemistry, 15 : 273-277.
- DANIELSSON (L.G.), MAGNUSSON (B.), WESTERLUND (S.), et ZHANG (K.), 1983.- Trace metals in the Göta river estuary. Estuarine Coastal and Shelf Science 17 : 73-85.
- DANIELSSON (L.G.), MAGNUSSON (B.), et WESTERLUND (S.), 1985.- Cadmium, Copper, Iron and Zinc in the North East Atlantic Ocean. Marine chemistry, 17 : 23-41.
- DONARD (O.), 1983.- Biogéochimie et hydrodynamique d'un système estuarien macrotidal. Thèse de Doctorat ès Sciences, Université de Bordeaux I.
- DUINKER (J.C.), HILLEBRAND (M.T.J.), NOLTING (R.F.) et WELLERSHAUS (S.), 1982.- The river Elbe : processus affecting the behaviour of metals and organochlorines during estuarine mixing. Netherland Journal of Sea Research. 15 : 141-169.
- DUMAS, 1985.- Le cadmium dans l'estuaire de la Gironde. D.E.S. de sciences naturelles. Université de Bordeaux I. 126 p.
- EGGIMAN (D.N.) et BETZER (P.R.), 1976.- Décomposition and analysis of refractory oceanic suspended materials. Analytical Chemistry, 48 (6) : 886-890.

- ELBAZ-POULICHET (F.), HUANG (W.W.), MARTIN (J.M.), et ZHU (J.X.), 1987.- Dissolved cadmium behaviour in some selected french and chinese estuaries. Consequences on cadmium supply to the ocean. Marine Chemistry, 22 : 125-136.
- ENGEL (D.W.) et FOWLER (B.A.), 1979.- Factors influencing cadmium accumulation and its toxicity to marine organisms.- Environmental Health Perspective, 28 : 81-88.
- ETCHEBER (H.), 1981.- Comparaison des diverses méthodes d'évaluation des teneurs en matière en suspension et en carbone organique particulaire des eaux marines du plateau continental aquitain. Journal de recherche océanographique, 2, p. 27-42.
- ETCHEBER (H.), 1983.- Biogéochimie de la matière organique en milieu estuarien ; comportement, bilan, propriétés. Cas de la Gironde. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Université de Bordeaux I. n° 778, 263 p.
- FRAZIER (J.M.), 1979.- Bioaccumulation of cadmium in marine organisms.- Environmental Health Perspective, 28 : 75-79.
- GEORGE (S.G.) et COOMBS (T.L.), 1977.- The effects of chelating agents on the uptake and accumulation of cadmium by *Mytilus edulis*. Marine Biology, 39 : 261-268.
- GEORGE (S.G.), CARPENE (E.), et COOMBS (T.L.), 1978.- The effects of salinity on the uptake of cadmium by the common mussel *Mytilus edulis* (L.). Physiology and behavior of marine organisms.- 12 th european symposium on marine biology.- Mac LUSKY (D.S.) and BERRY (A.J.), ed. Pergamon Press.
- GOBEIL (C), SILVERBERG (N.), SUNDBY (B.), et COSSA (D.), 1987.- Cadmium diagenesis in Laurentian Trough sediments. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol 51, n° 3, 589-596.
- HARDY (J.T.) SCHMIDT (A.L.), et APTS (C.N.), 1981.- Marine sediments and interstitial water : effects on bioavailability of cadmium to gills of the Clam *Protothaca staminea*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 27 : 798-805.
- JACKIM (E.S.), MORRISSON (G.), et STEELE (R.), 1977.- Effects of environmental factors on radiocadmium uptake by four species of Marine bivalves. Marine Biology, 40 : 303-308.
- JOUANNEAU (J.M.), 1974.- Etude sédimentologique d'un système côtier évolutif : la pointe de la Coubre (embouchure de la Gironde) France. Thèse de Doctorat ès Sciences. Université de Bordeaux I. n° 1136, 161 p.
- JOUANNEAU (J.M.), 1982.- Matières en suspension et oligo-éléments métalliques dans le système estuarien girondin.- Comportement et flux.- Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Université de Bordeaux I.

- JOUANNEAU (J.M.), BERGER (P.), BOUTIER (B.), EWALD (M.), FONTUGNE (M.) et HERAL (H.), 1985.- Extension des apports solides et liquides d'origine estuarienne dans les eaux de surface du plateau aquitain interne. Revue des travaux de l'Institut des Pêches Maritimes, 47 (1 et 2) : 5-24.
- JOUANNEAU (J..M.), LATOUCHE (C), et PHILIPPS (I.), 1985.- Etude géochimique du cadmium en Gironde et en baie de Marennes. Rapport IGBA Contrat 84 17490 IFREMER. 33 p.
- JOUANNEAU (J.M.), LATOUCHE (C.), et PHILIPPS (I.), 1986.- Etude des échantillons de la campagne CAGIMA II. Rapport interne IGBA. 27 pages.
- KERFOOT (W.B.) et JACOBS (S.A.), 1976.- Cadmium accrual in combined wastewater treatment. Aquaculture system. Environmental Science and Technology, 10 : 662-667.
- KNAUER (G.A.) et MARTIN (J.H.), 1981.- Phosphorus and cadmium cycling in the North East Pacific waters. Journal of Marine Research, 39 : 65-76.
- KREMLING (K.) et PETERSEN (N.), 1984.- Synoptic survey of dissolved trace metals levels in Baltic surface waters. Marine Pollution Bulletin, 15 : 329-334.
- LONG (D.T.) et ANGINO (E.E.), 1977.- Chemical speciation of Cd, Cu, Pb and Zn in mixed fresh water, sea water and brine solutions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 41 : 1183-1191.
- MAGNUSSON (B.) et RASMUSSEN (L.), 1982.- Trace metal levels in coastal seawater. Investigation of danish waters. Marine Pollution Bulletin, 13 : 81-84.
- MANTOURA (R.F.C.), DICKSON (A.) et RILEY (J.P.), 1978.- The complexation of metals with humic materials in natural waters. Estuarine and Coastal Marine Science, 6 : 387-408.
- MART (L.), 1982.- Comparative studies on the distribution of heavy metals in the oceans and coastal waters. The Science of the Total Environment, 26 : 1-17.
- MARTIN (J.H.) et BROENKOW (W.W.), 1975.- Cadmium cycling in the North East Pacific waters. Journal of Marine Research, 39 : 65-76.
- MOHLENBERG (F.) et JENSEN (A.), 1980. The ecotoxicology of cadmium in fresh and seawater and water pollution with cadmium in Denmark.- The national agency of environmental protection, Denmark.
- NEVEUX (J.), 1983.- Dosage de la chlorophylle et des phaeopigments par fluorimétrie. In : Manuel des analyses chimiques en milieu marin. CNEOX- BNDO.

- NICHOLSON (J.K.), KENDALL (M.D.), et OSBORN (D.), 1983.- Cadmium and mercury nephrotoxicity. Nature, 304 : 633-635.
- NOEL-LAMBOT (F.), BOUQUEGNEAU (J.M.), FRANKENNE (J.M.), et DISTECHE (A.), 1978. Le rôle des métallothioneines dans le stockage des métaux lourds chez les animaux marins. Revue Internationale d'Océanographie Médicale, XLIX : 13-20.
- O'CONNOR (O.) et CONNOLLY (J.P.), 1980.- The effect of concentration of adsorbing solids on the partition coefficient. Water Research, 14 : 1517-1523.
- POULIQUEN (M.), 1975.- Etude minéralogique et géochimique des sédiments du littoral vendéo-charentais et de la vasière Ouest-Gironde (France) : application à la connaissance de l'origine et de la dynamique des vases dans la baie de Marennes-Oléron. Thèse de 3ème cycle n° 1239. Université de Bordeaux I.
- SAGOUIS (G.), 1976.- Etude des processus sédimentaires dans l'anse du Verdon (estuaire de la Gironde). Thèse de Doctorat ès Sciences. Université de Bordeaux I. n° 1330, 118 p.
- SALOMONS (W.) et FORSTNER (U.), 1984.- Trace metals in estuaries. Field investigations. In : Metals in the hydrocycle. Springer-Verlag, Berlin.
- SANDERS (J.G.) et CIBIK (S.J.), 1985.- Reduction of growth rate and resting spore formation in a marine diatom exposed to low levels of cadmium. Marine Environmental Research, 16 : 165-180.
- SAY (P.J.), 1978.- Le Riou-Mort, affluent du Lot pollué par les métaux lourds. 1) Etude préliminaire de la chimie et des algues benthiques. Annales de Limnologie, 14 : 113-131.
- SHILLER (A.M.) et BOYLE (E.A.), 1983.- Trace metals in the plume of the Mississippi river. EOS, 64 (52).
- SHOLKOVITZ (E.R.), 1978.- The flocculation of dissolved Fe, Mn, Al, Cu, Ni, Co and Cd during estuarine mixing. Earth and Planetary Science Letters, 41 : 77-86.
- SIMPSON, (W.R.), 1981.- A critical review of cadmium in the marine environment. Progress in Oceanography, 10, 1-70.
- STRICKLAND (J.D.H.) et PARSONS (T.R.), 1968.- A practical handbook of seawater analysis. Bulletin of the fisheries research board of Canada, 167, 310 p.
- TALBOT (V.), 1985.- Relationship between cadmium concentrations in seawater and those in the mussel *Mytilus edulis*. Marine Biology, 85 : 51-54.
- THIBAUD (Y.) et BOUTIER (B.), 1987.- La surveillance du mercure et du cadmium dans les huîtres et les moules du littoral français - 1979 - 1985. Synthèse des résultats du programme RNO. A paraître.

- THIBAUD (Y.), 1983.- Dosage de métaux (Cu, Zn, Fe, Pb, Cd). In : Manuel des analyses chimiques en milieu marin, p. 263-273.- CNEXO.
- TOURENQ (J.N.), CAPBLANCQ (J.) et CASANOVA (H.), 1978.- Bassin versant et hydrologie de la rivière Lot. Annales de Limnologie, 14, 9-23.
- VOLMAT (J.), 1953.- La pointe de la Coubre et ses abords du 17ème siècle à nos jours. Recherches Hydrographiques sur le Régime des Côtes, 28 : 197-271.
- WRIGHT (D.A.), 1978.- Heavy metal accumulation by aquatic invertebrates. Applied Biology, 3 : 311-394.

* * * * *

FIGURES

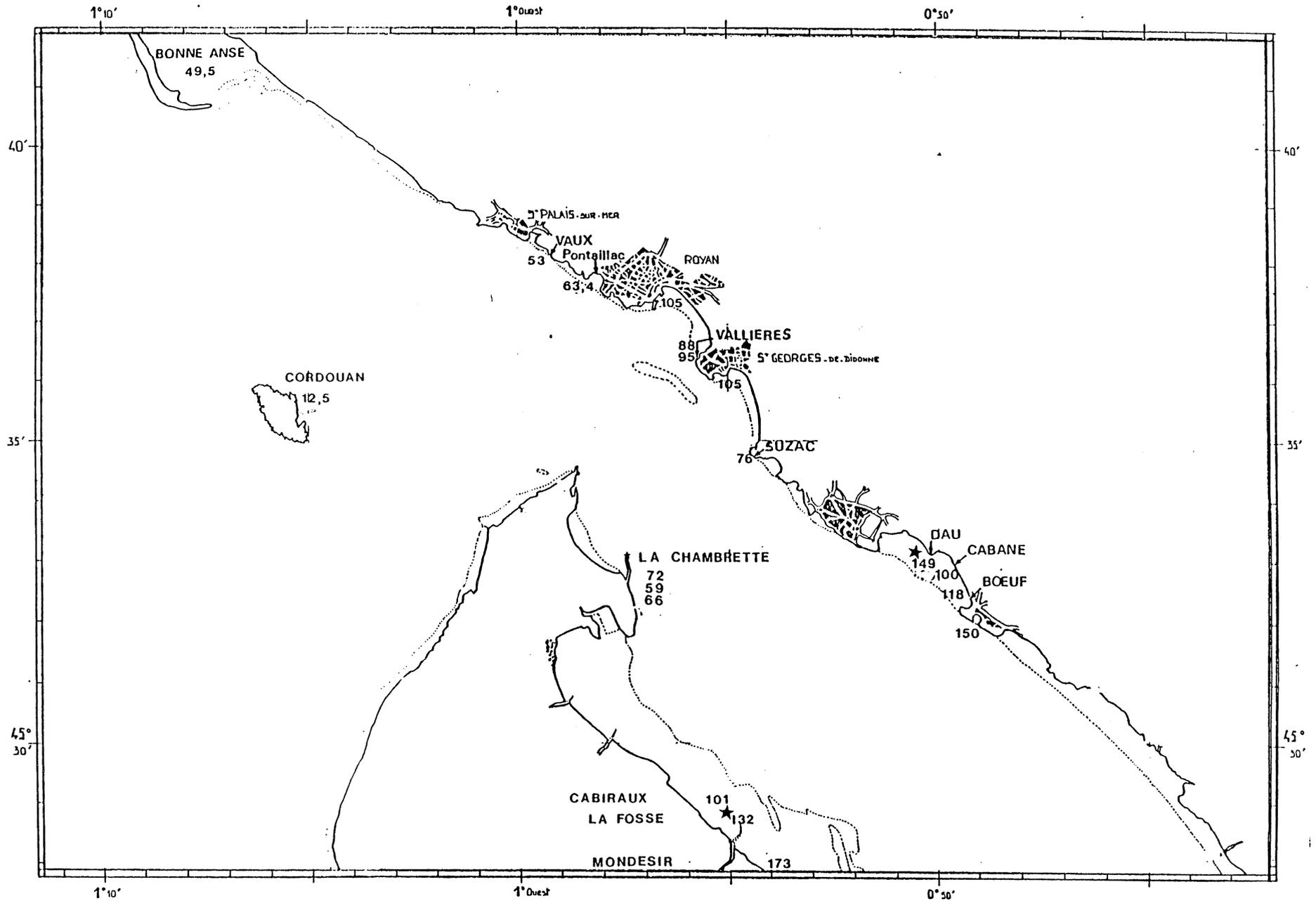


Figure 4 - Teneurs en cadmium des huîtres de Gironde ($\mu\text{g/g}$ de poids sec).

(*) Sites d'implantation d'huîtres originaires d'Arcachon pour l'étude de la cinétique de contamination.

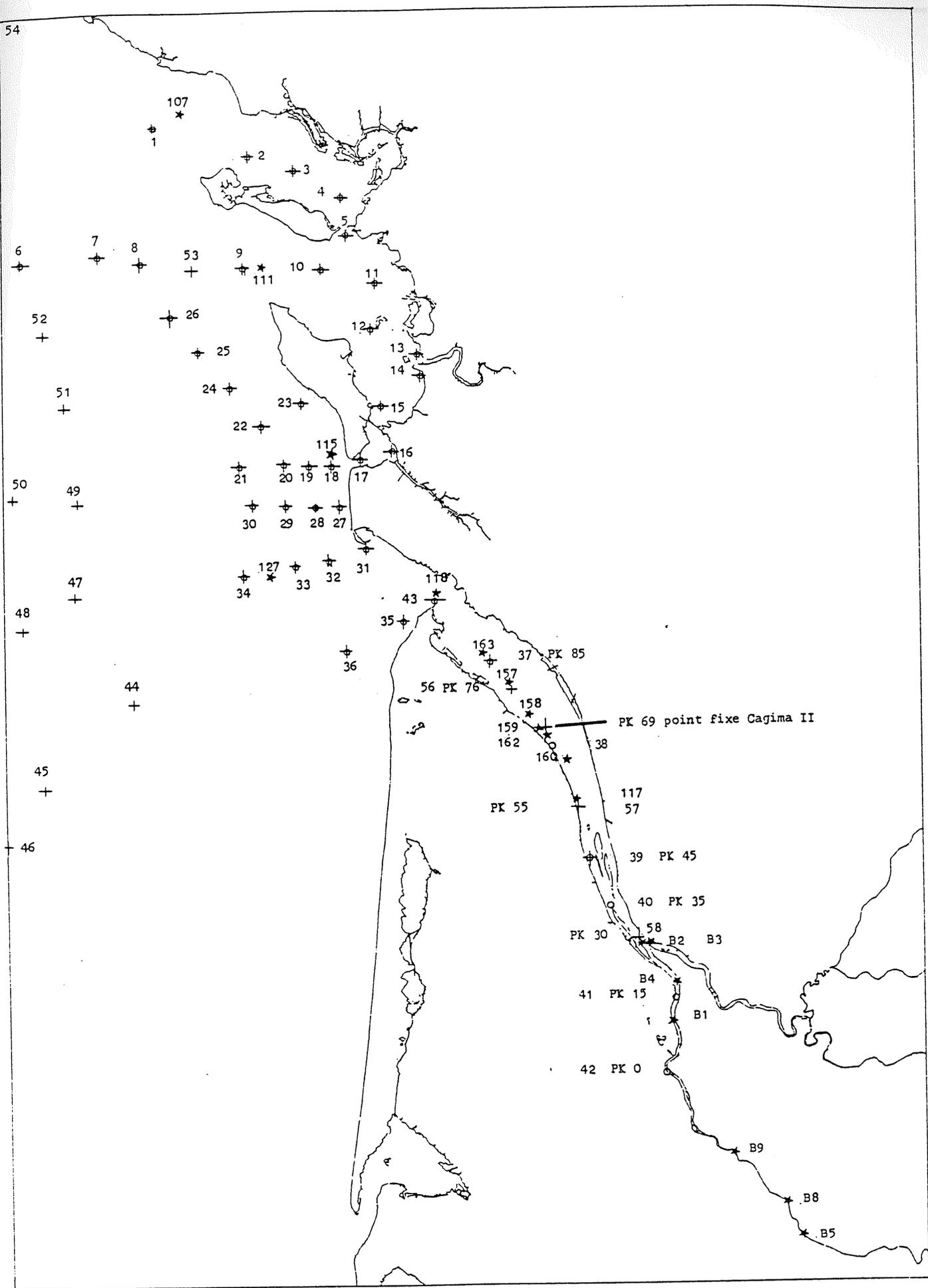


Figure 5 - Emplacement des stations de prélèvement d'eau au cours des campagnes CAGIMA I (O), CAGIMA II (+) et INTERSITE III ().

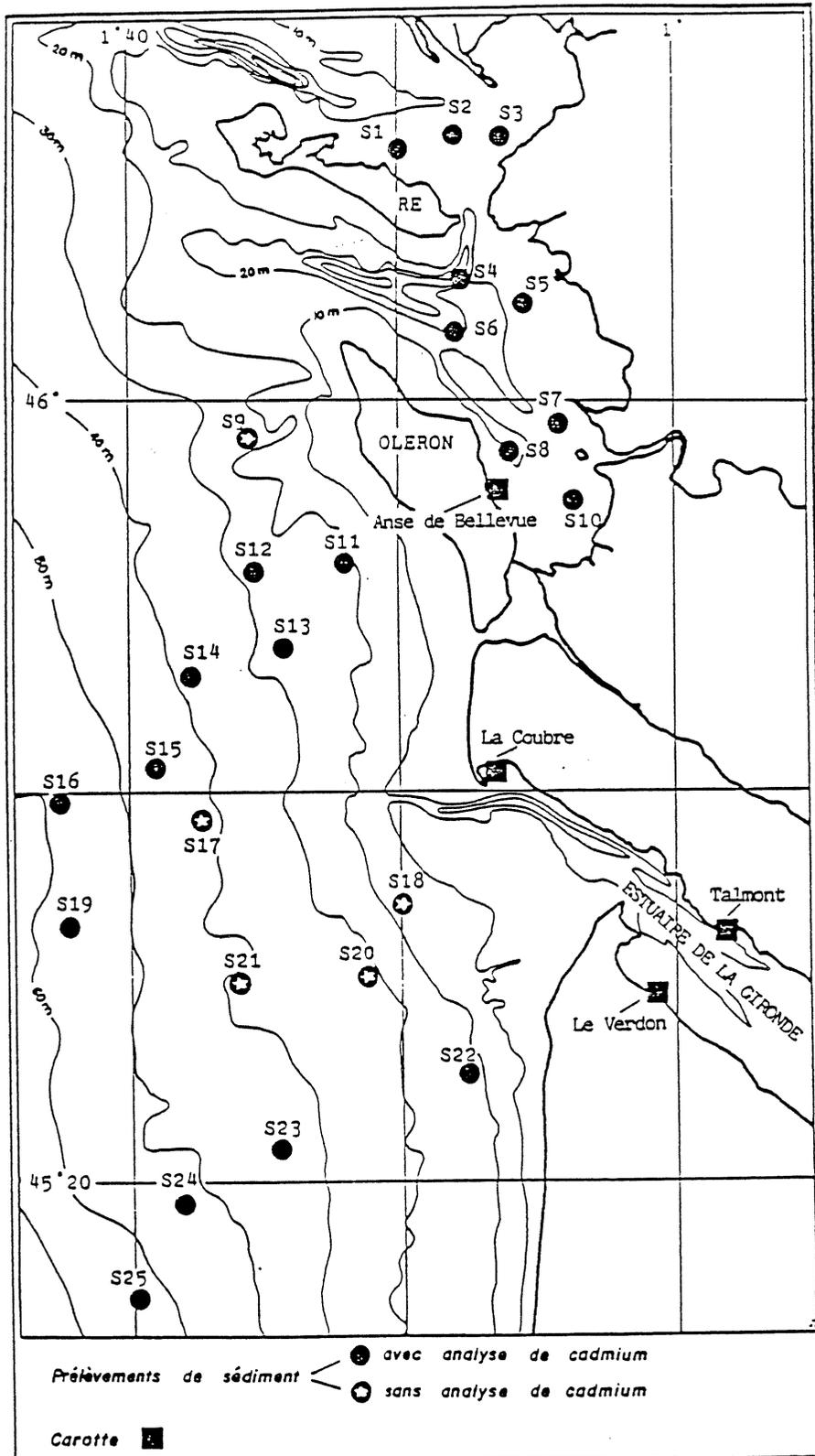


Figure 6 - Plan d'échantillonnage des sédiments.

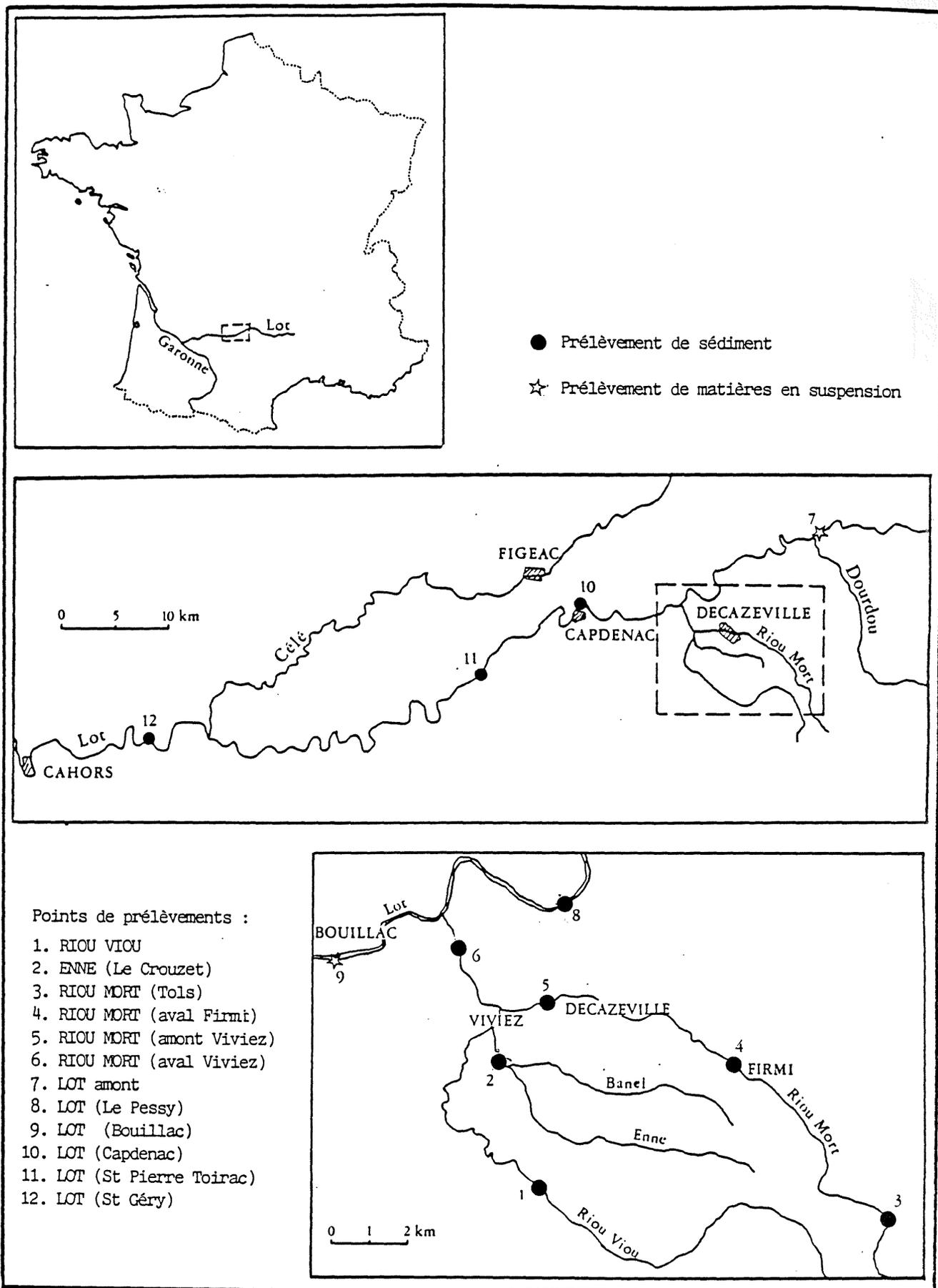


Figure 7 - Localisation des prélèvements amont.

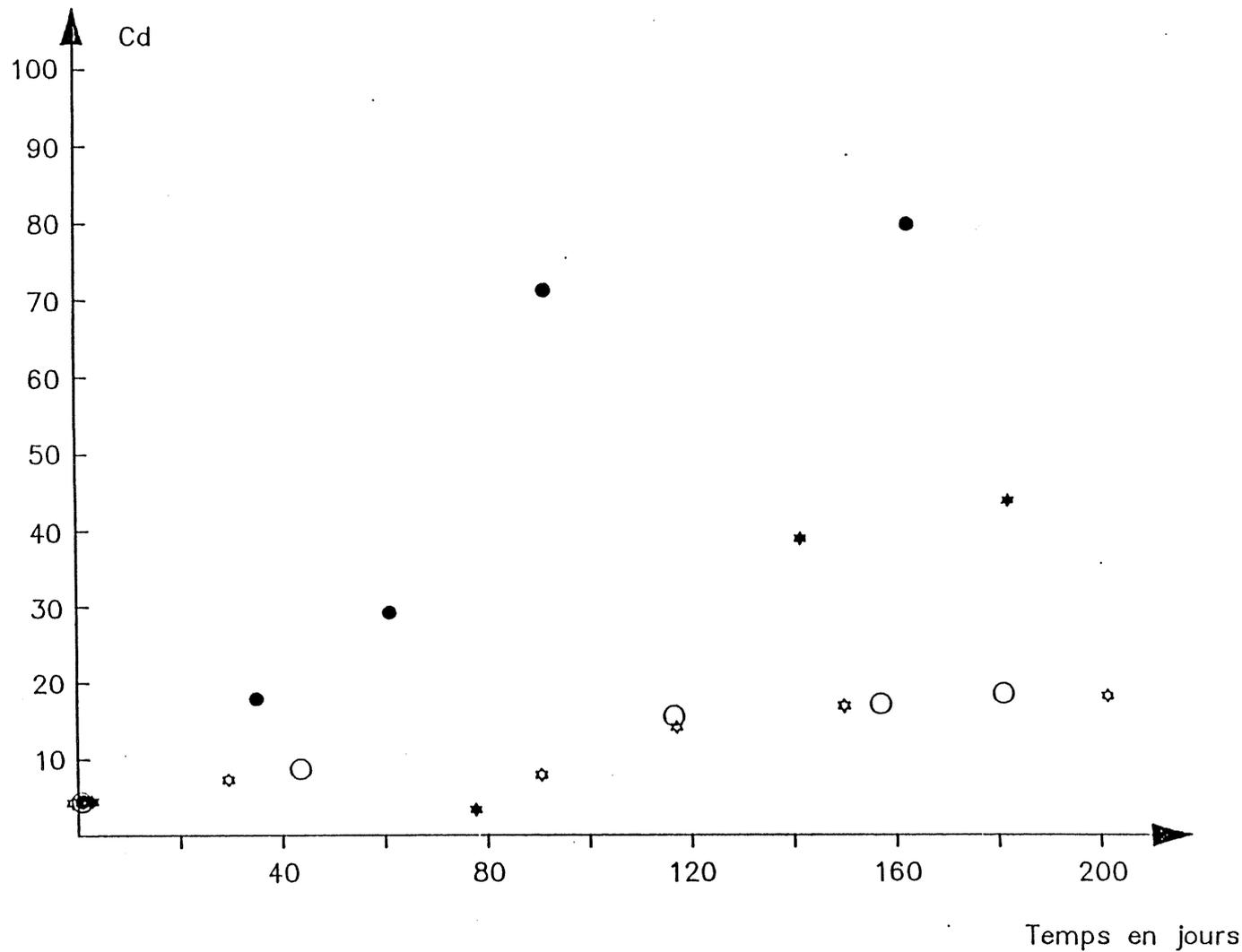


Figure 8 - Evolution des teneurs en cadmium des tissus mous d'huîtres d'Arcachon implantées en Gironde.

● Implantation du 10.5.83 à La Fosse
 ★ Implantation du 10.5.83 à Dau

○ Implantation du 20.10.83 à La Fosse
 ☆ Implantation du 26.10.83 à Dau

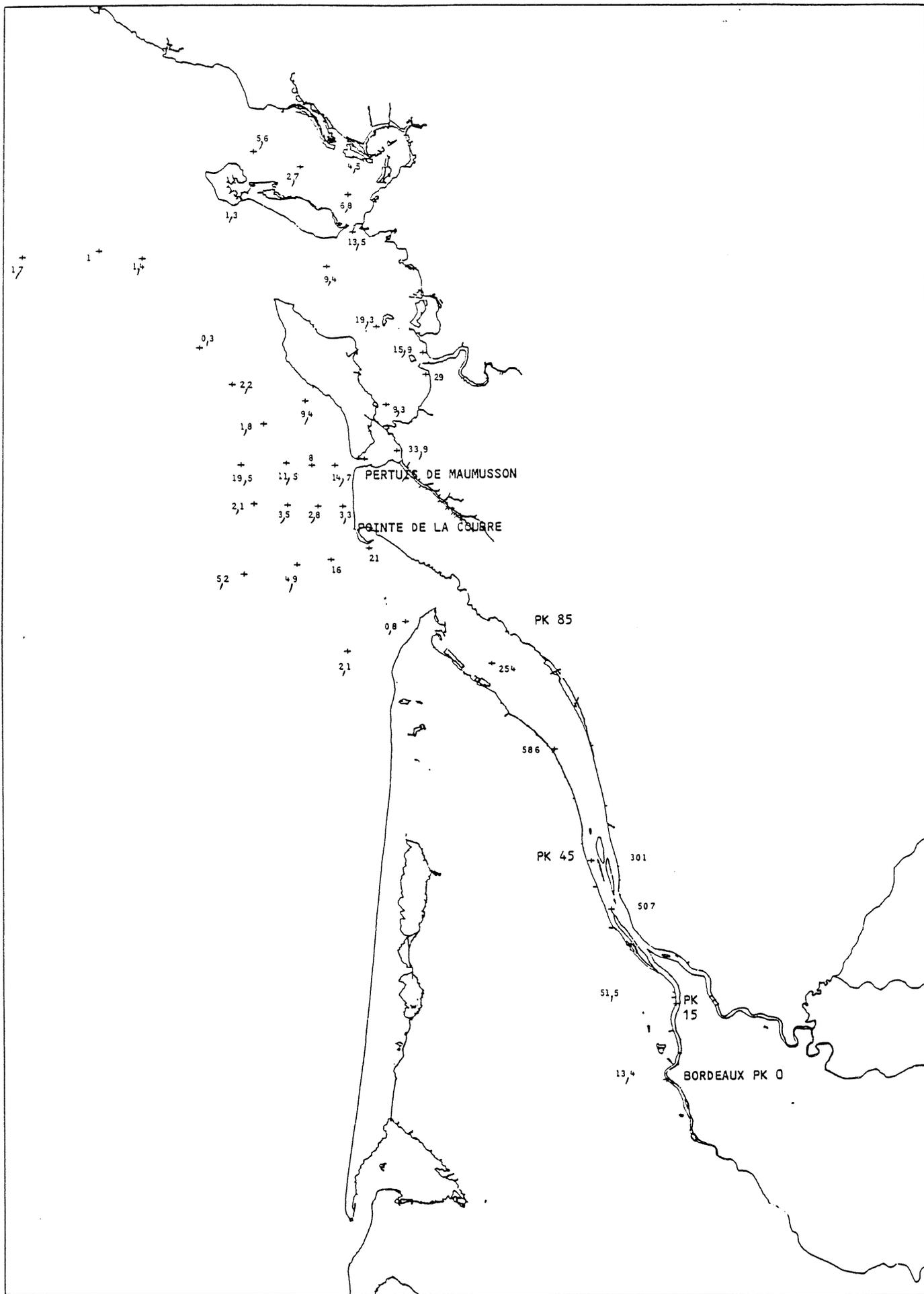


Figure 10 - Campagne CAGIMA I₁: teneurs en matières en suspension de l'eau de surface (mg.l⁻¹). 68

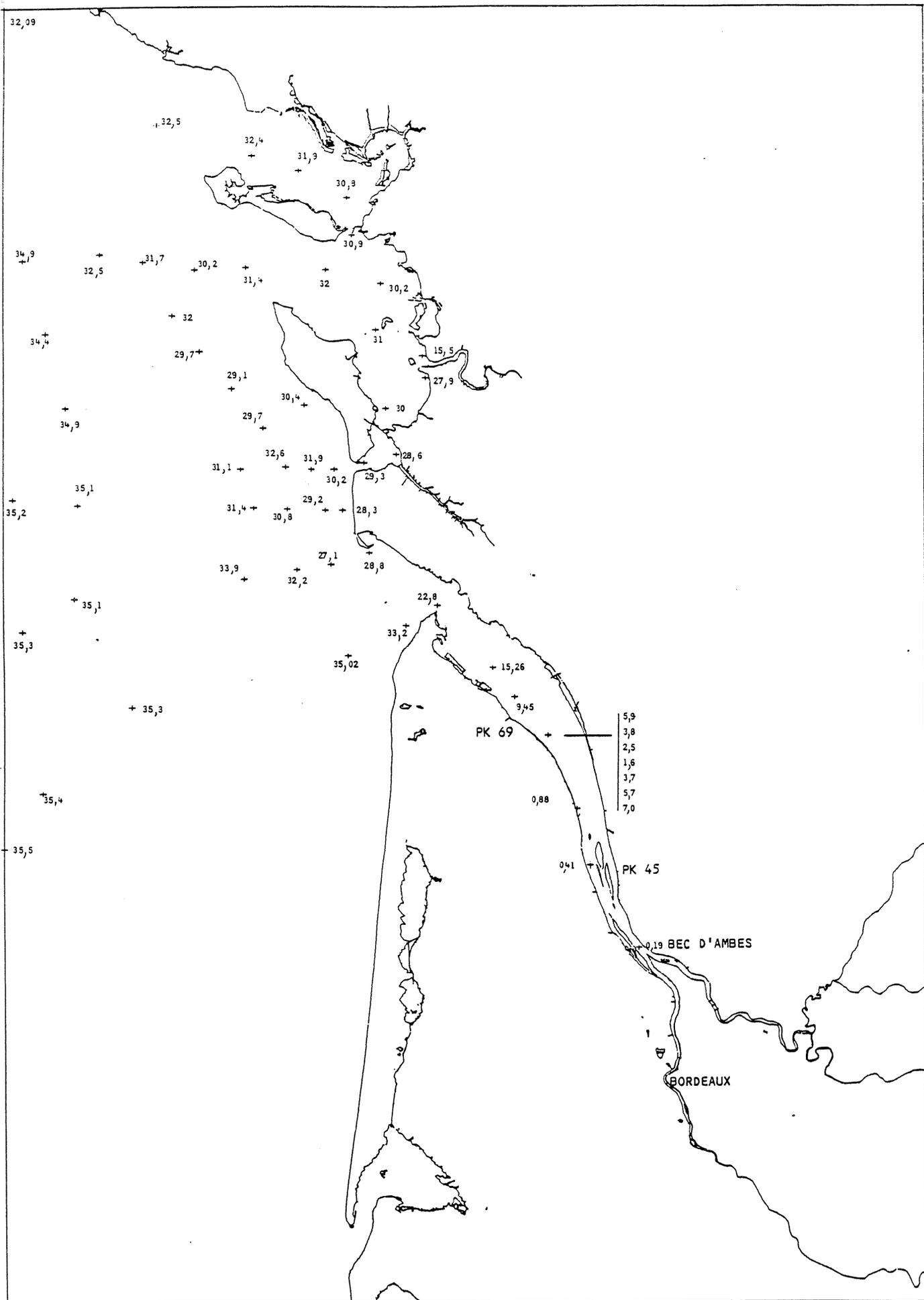


Figure 12 - Campagne CAGIMA II. Salinité des eaux superficielles (‰).

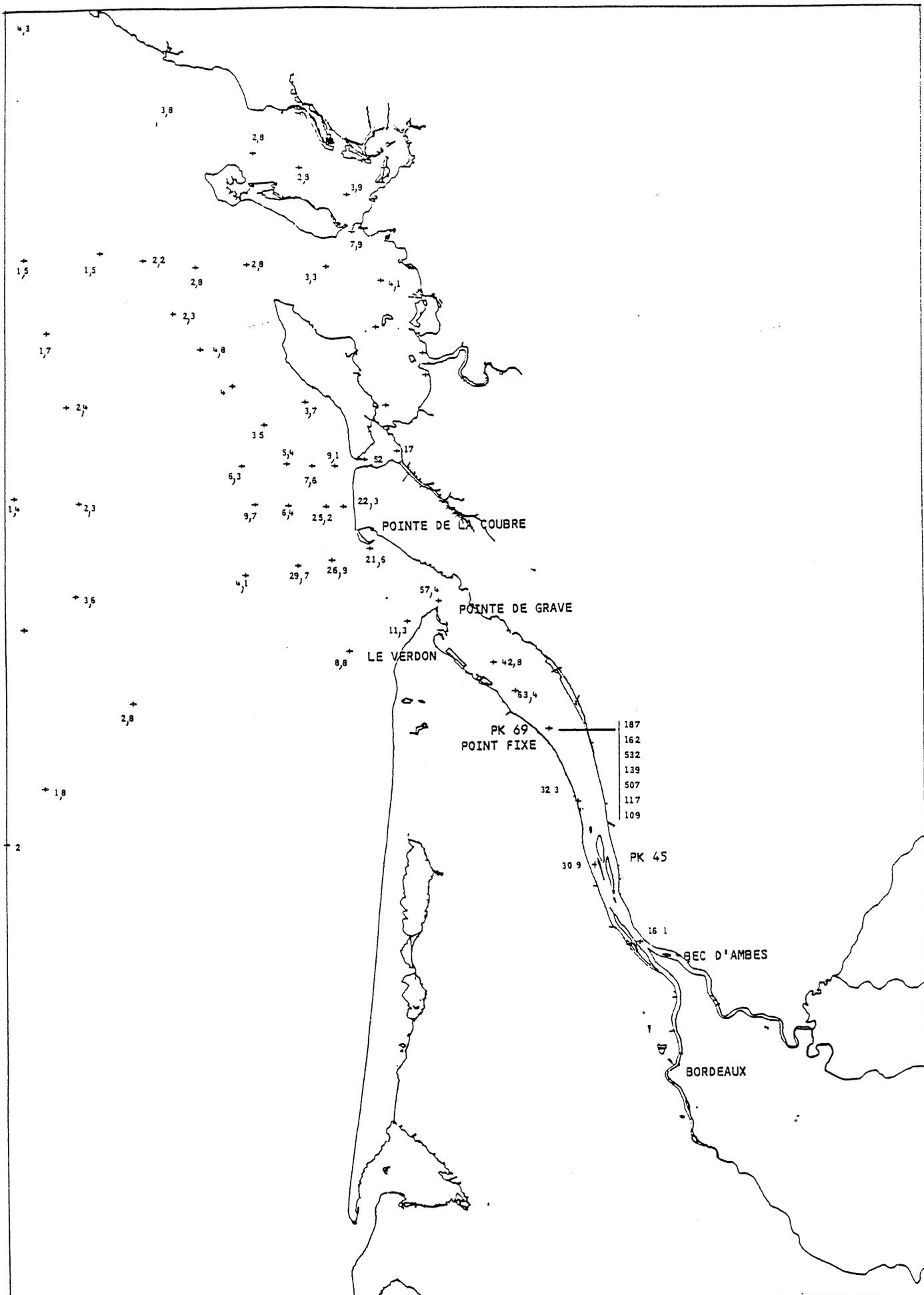


Figure 13 - Campagne CAGIMA II. Teneur en matières en suspension des eaux superficielles (mg.l^{-1}).

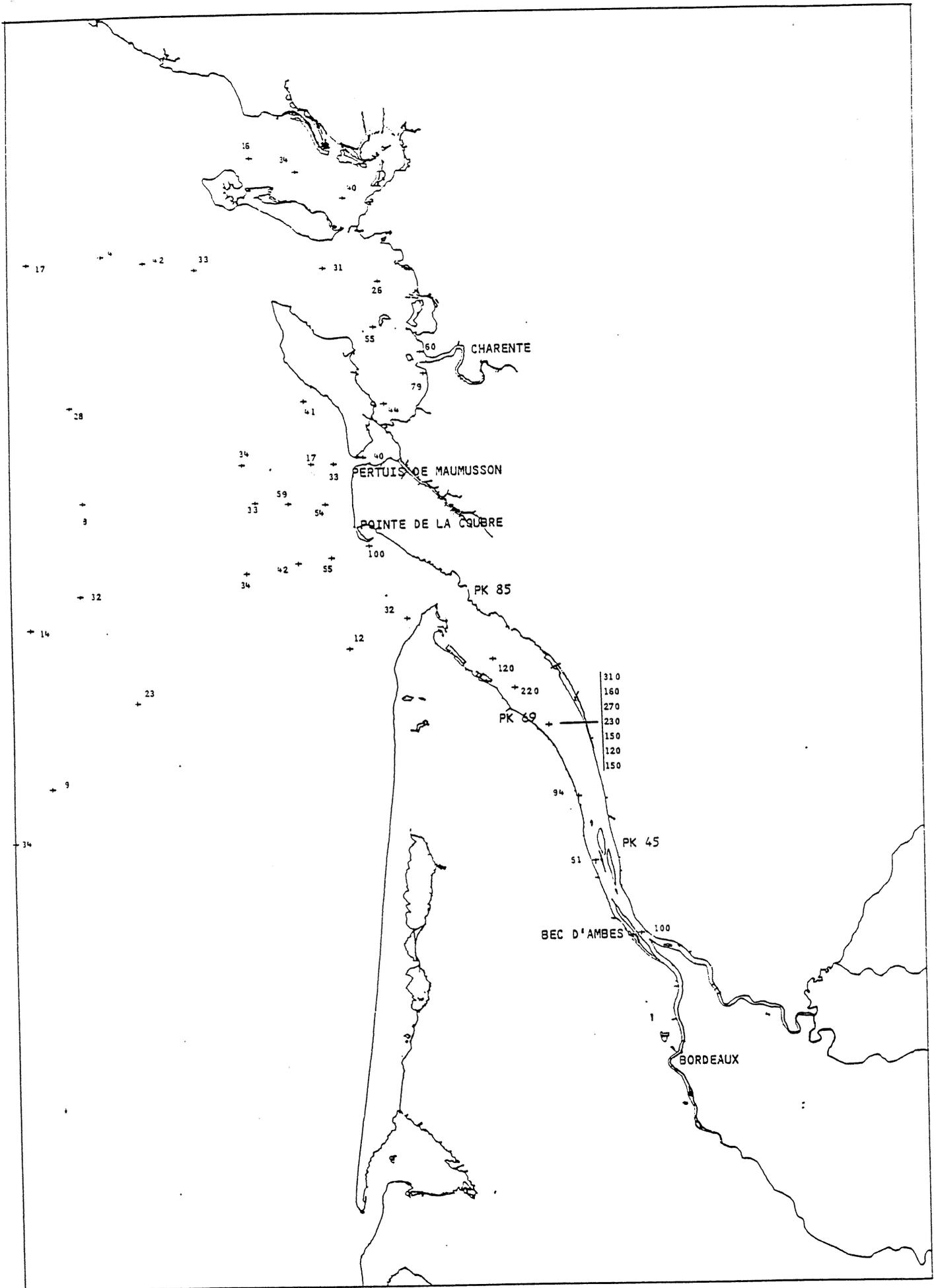


Figure 14 - Campagne CAGIMA II. Teneur en cadmium dissous des eaux superficielles (ng/l).

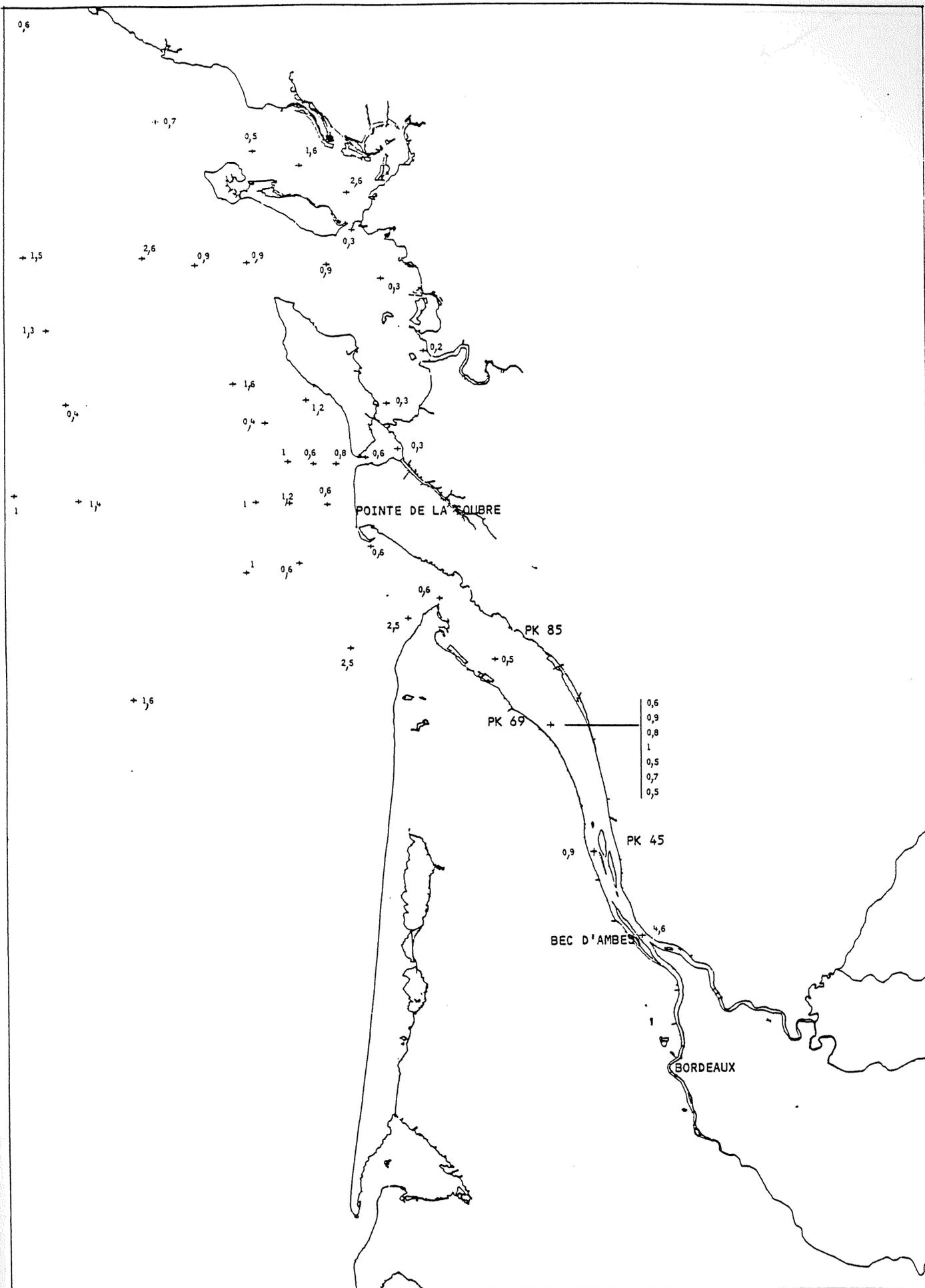


Figure 15 - Campagne CAGIMA II. Cadmium particulaire dans les eaux superficielles ($\mu\text{g/g}$ de poids sec).

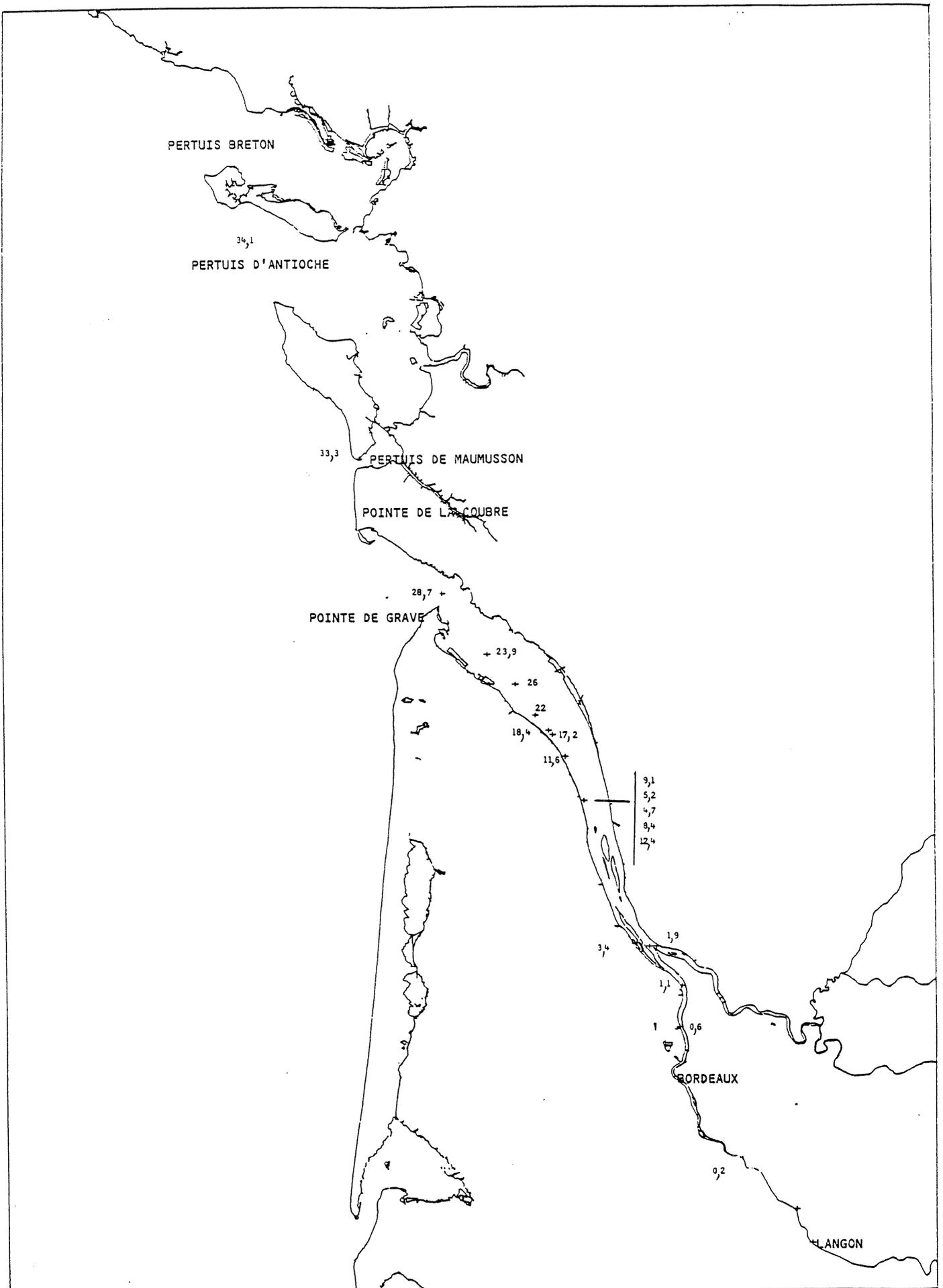


Figure 16 - Campagne INTERSITE III. Salinité des eaux de surface (‰).

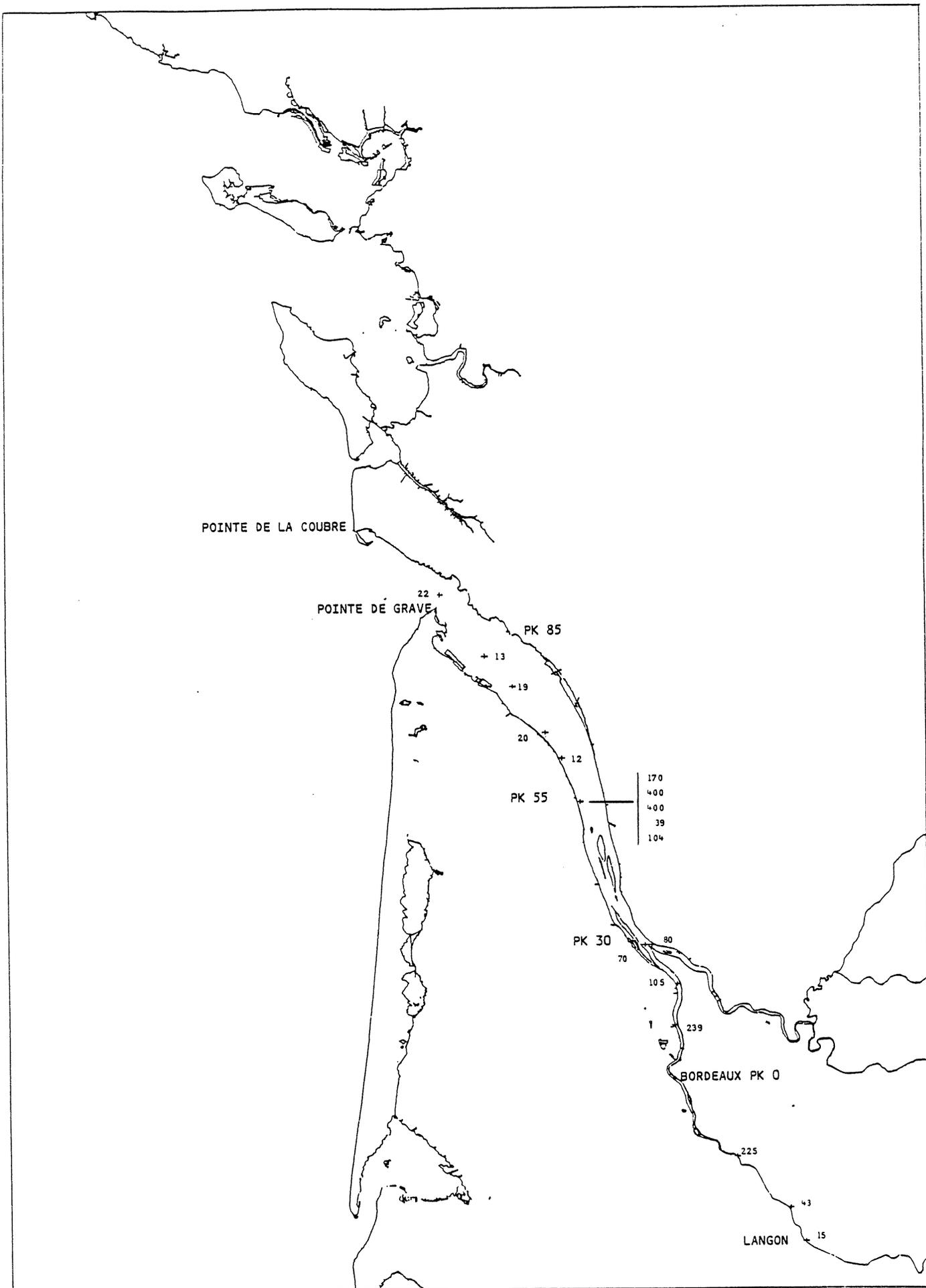


Figure 17 - Campagne INTERSITE III. Turbidité (NTU) des eaux superficielles.

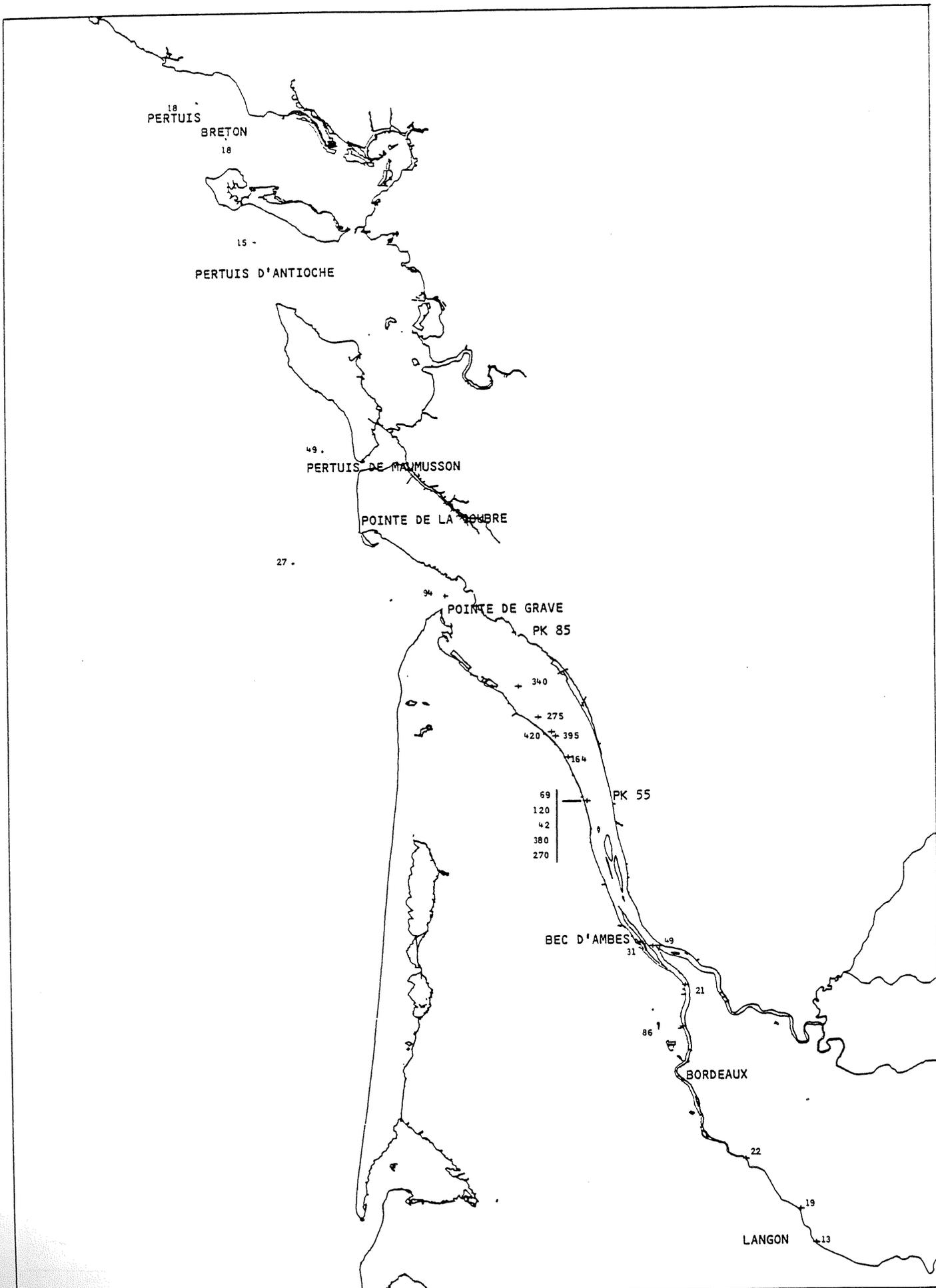


Figure 18 - Campagne INTERSITE II. Teneur en cadmium dissous
des eaux superficielles (ng/l).

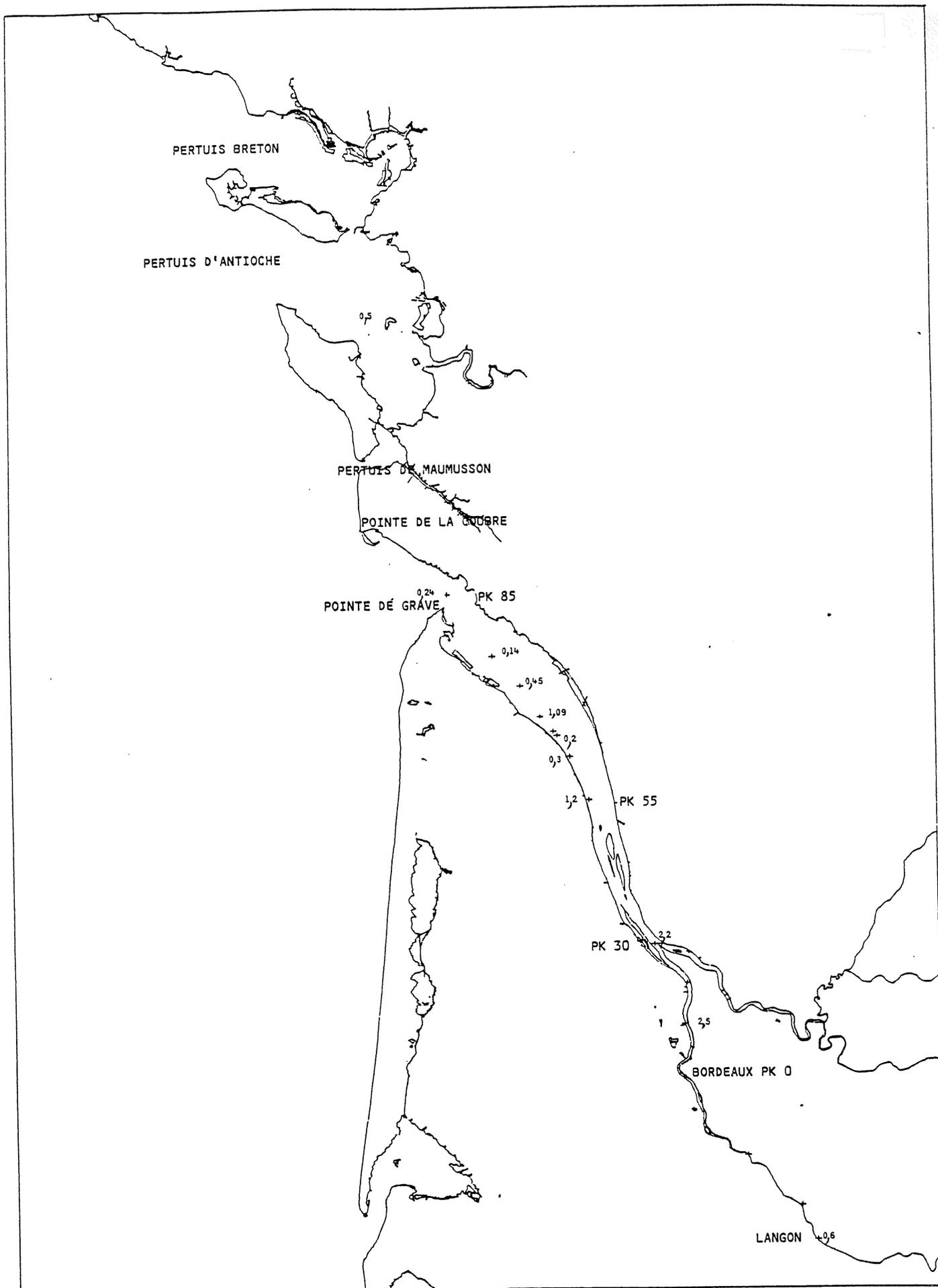


Figure 19 - Campagne INTERSITE III. Teneur en cadmium particulaire des eaux superficielles ($\mu\text{g/g}$, matière sèche).

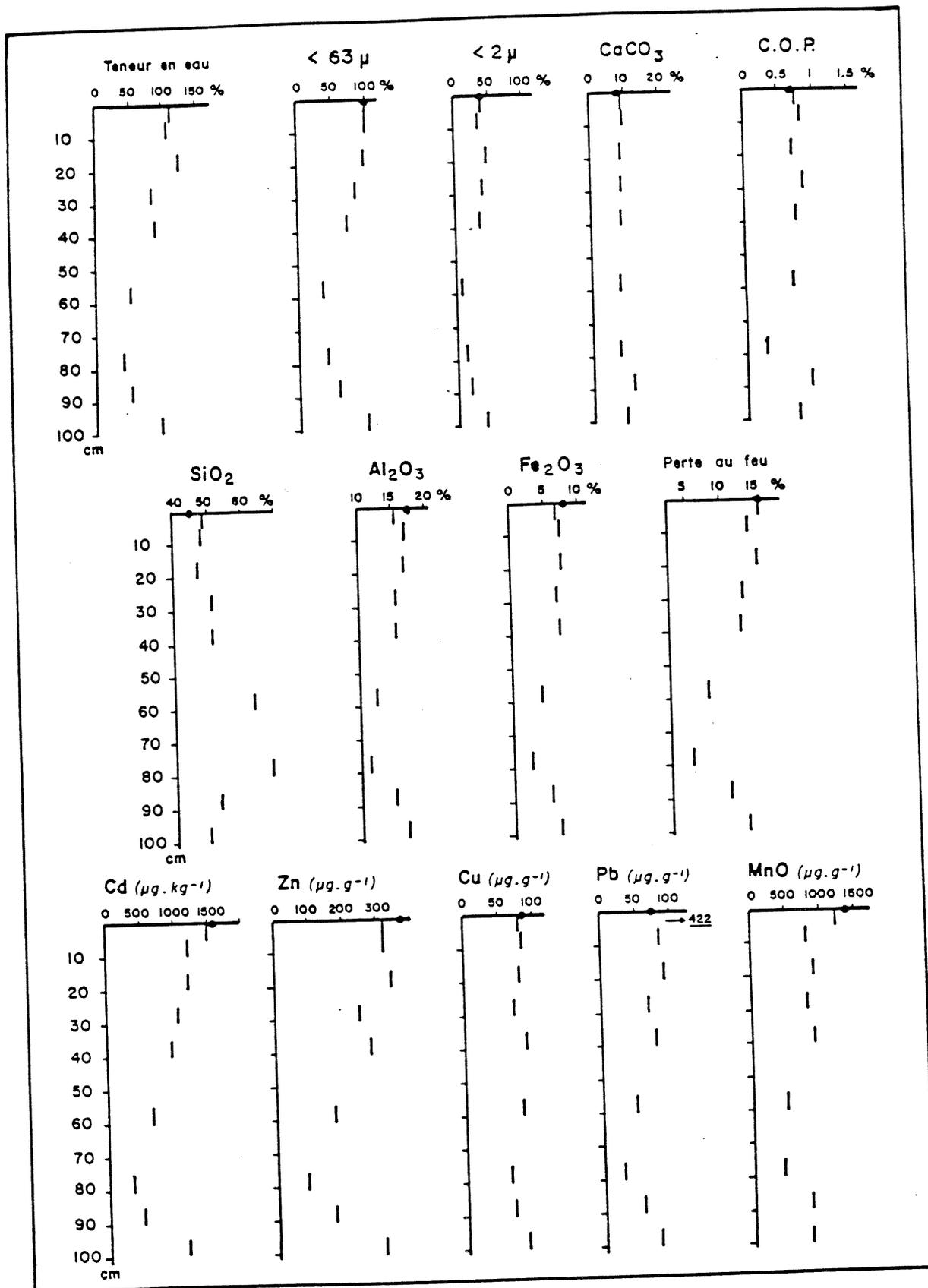


Figure 20 - Caractéristiques sédimentologiques et géochimiques de la carotte du Verdon.

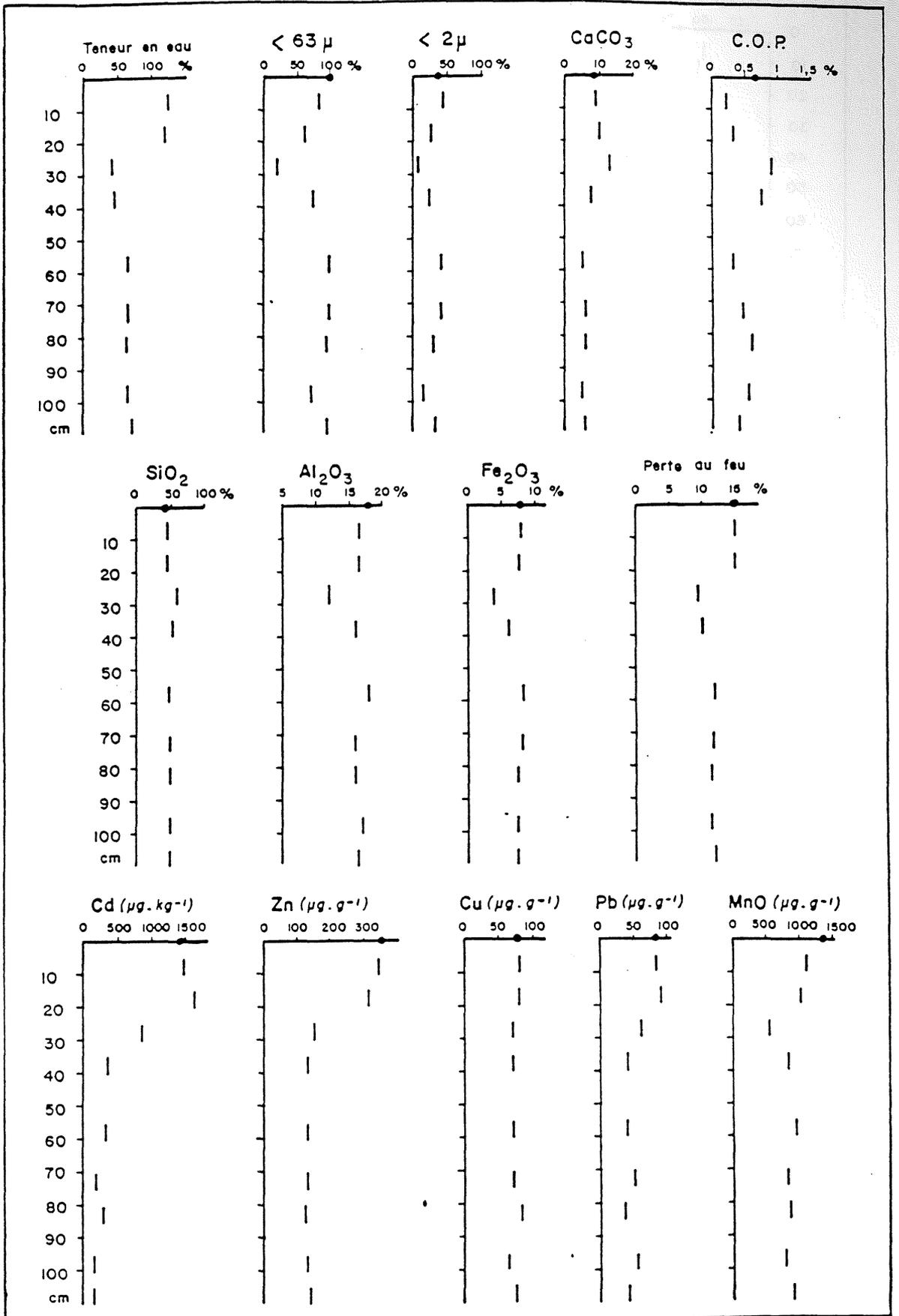


Figure 21 - Caractéristiques sédimentologiques et géochimiques de la carotte de Talmont.

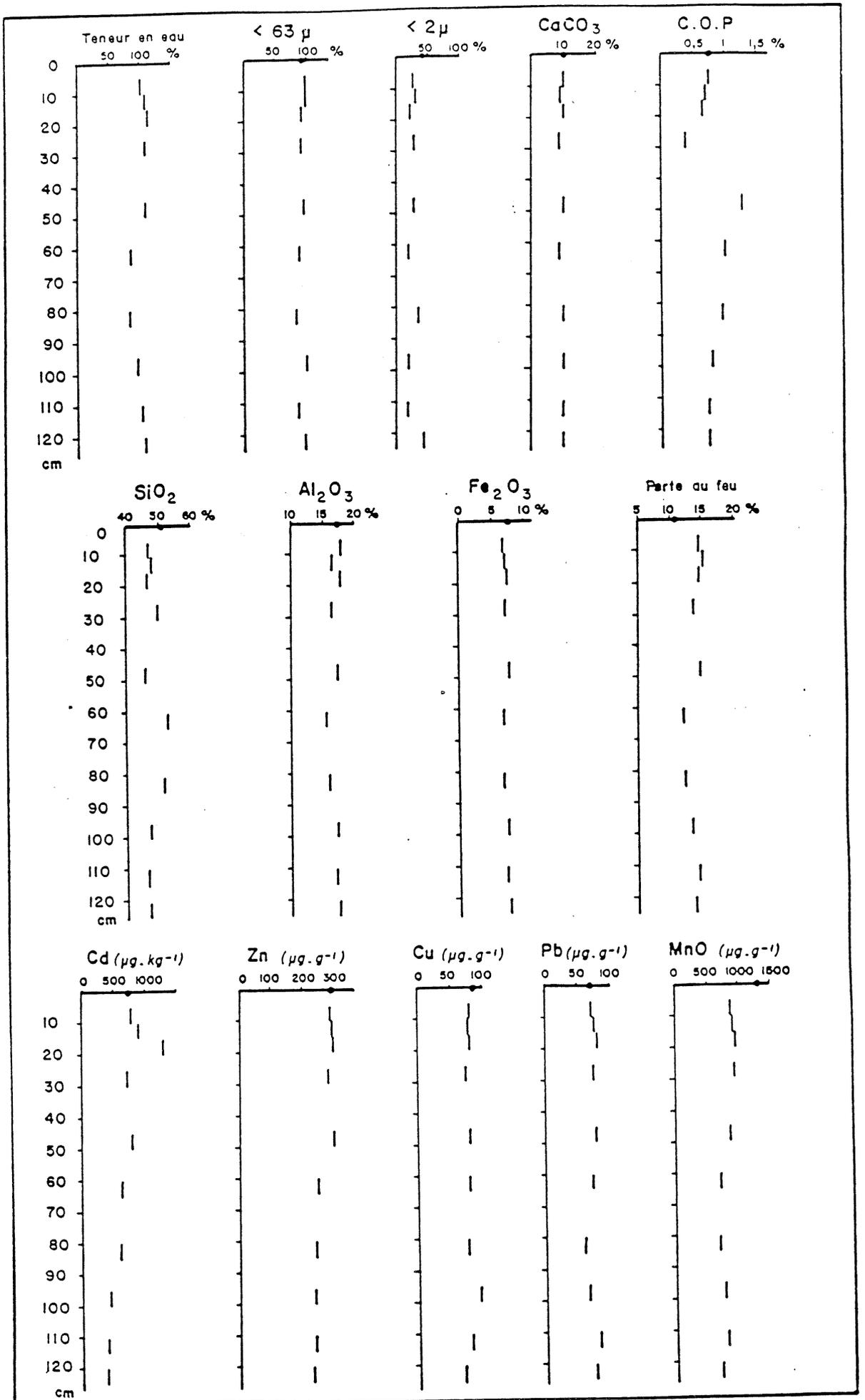


Figure 22 - Caractéristiques sédimentologiques et géochimiques de la carotte de La Coubre.

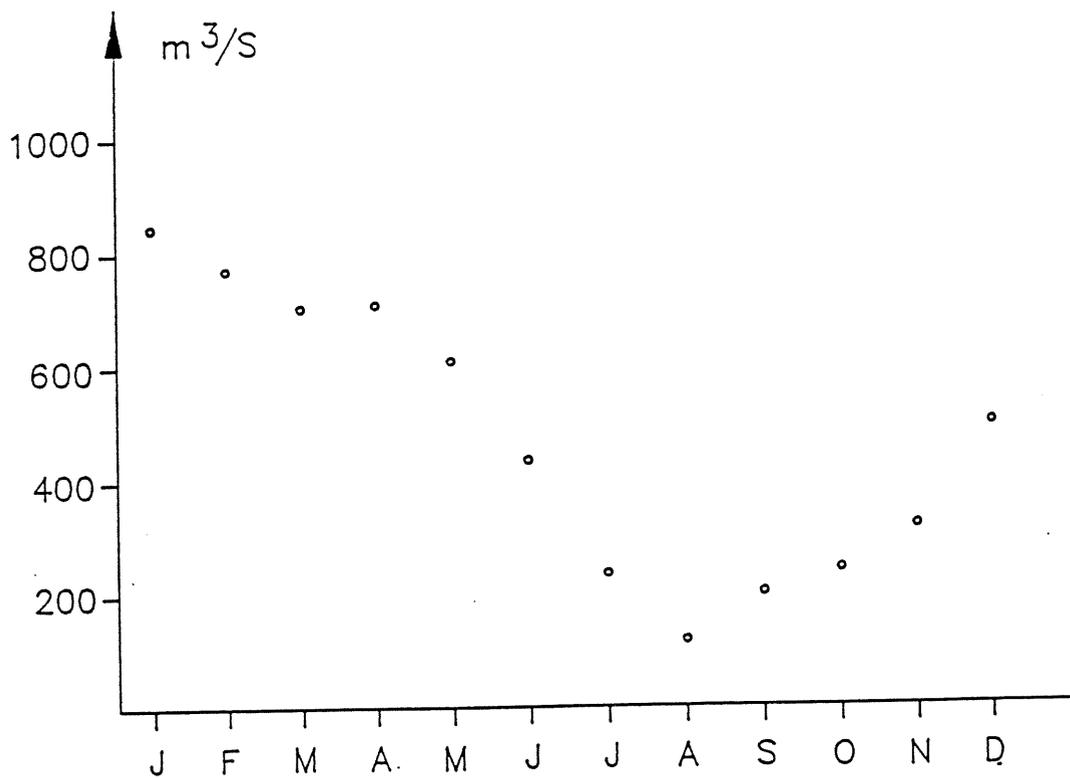


Figure 23 - Débits moyens de la Garonne entre 1960 et 1970.

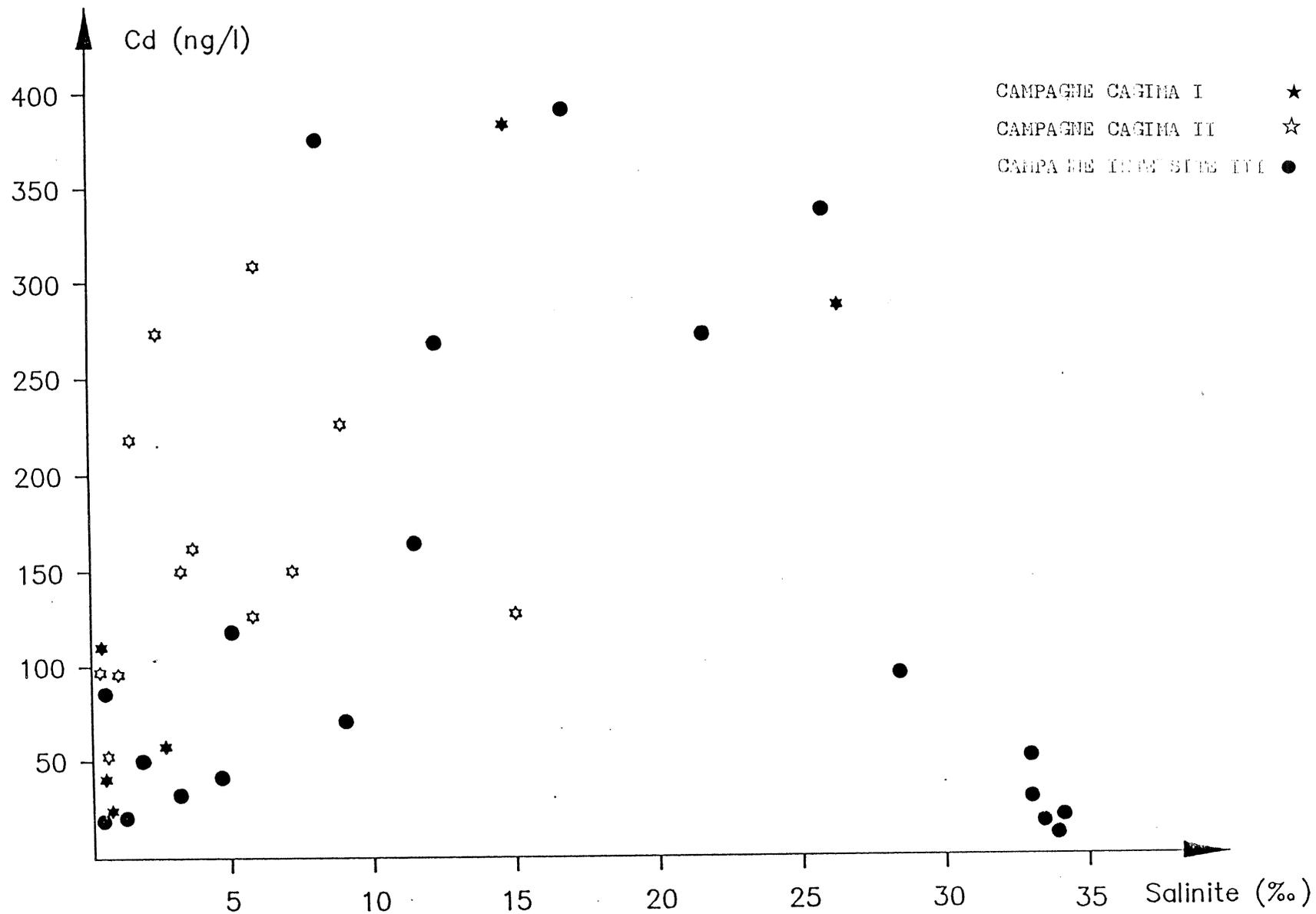


Figure 24 - Relation cadmium dissous/salinité dans l'estuaire de la Gironde.

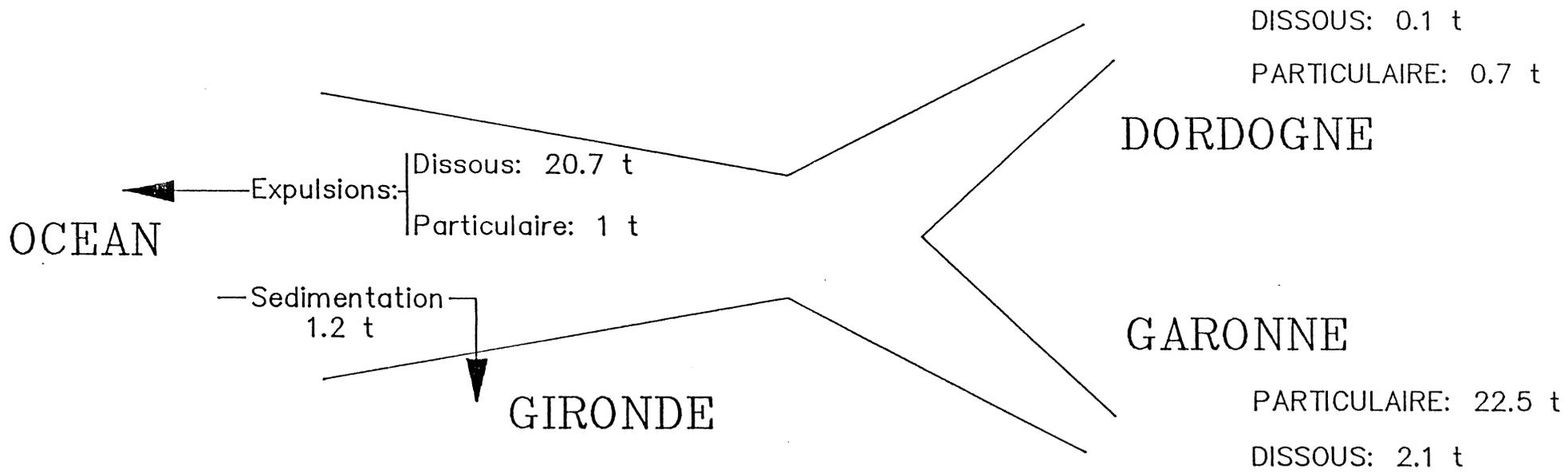


Figure 25 - Bilan de masse du cadmium dans la Gironde.

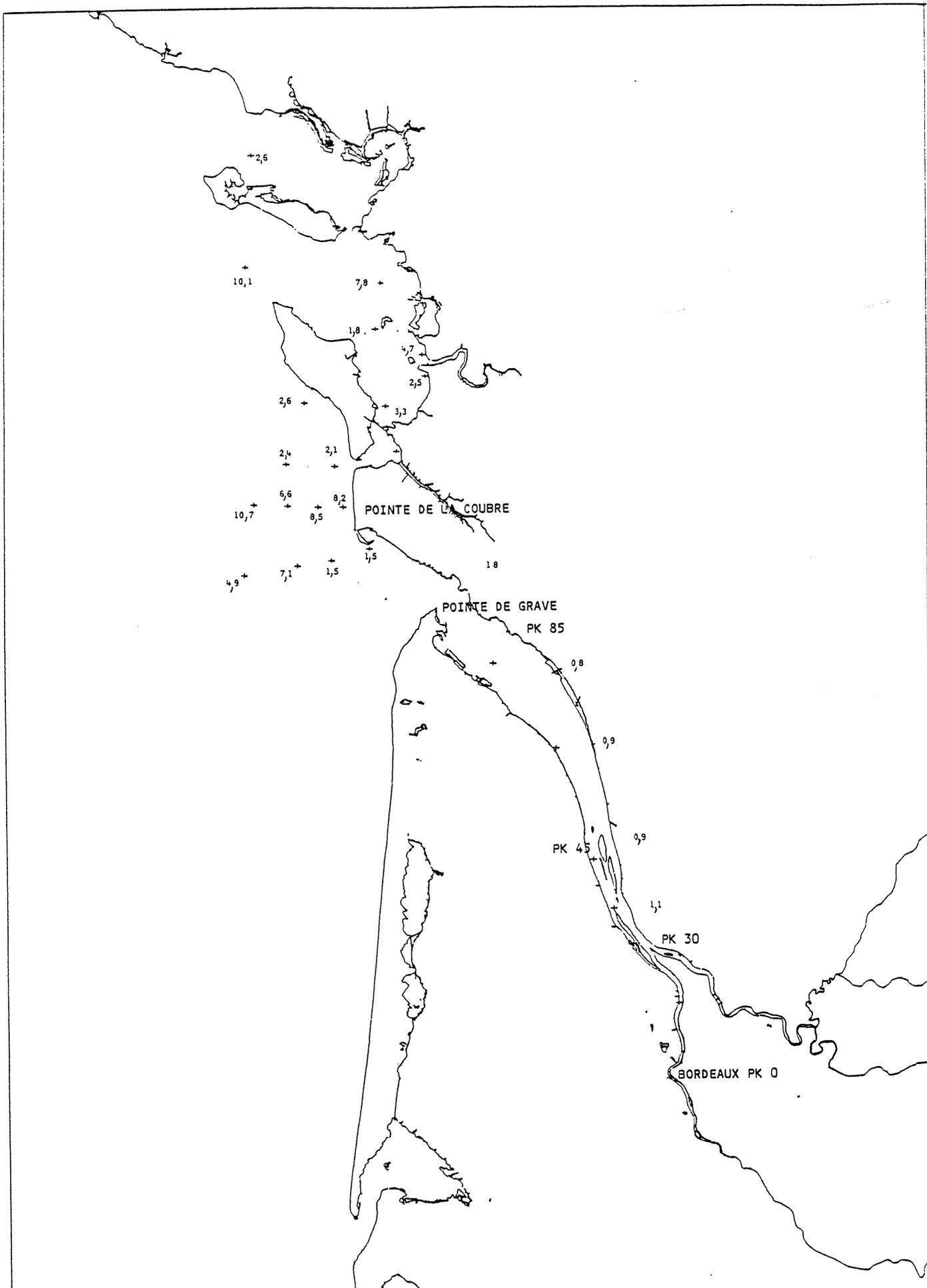


Figure 26 - Campagne CAGIMA I. Pourcentage de carbone particulaire en surface.

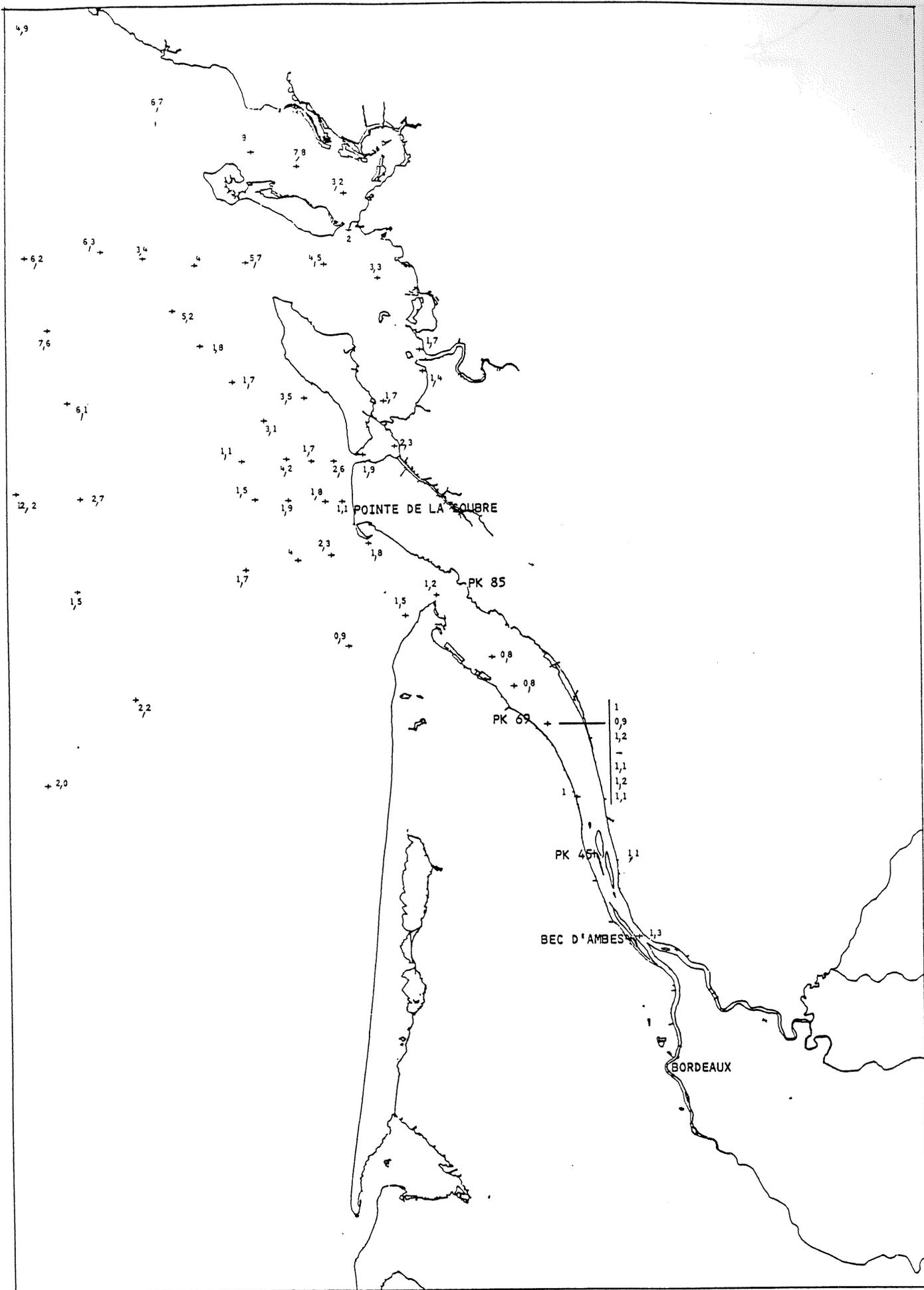


Figure 27 - Campagne CAGIMA II. Pourcentage de carbone organique particulaire (eaux superficielles).

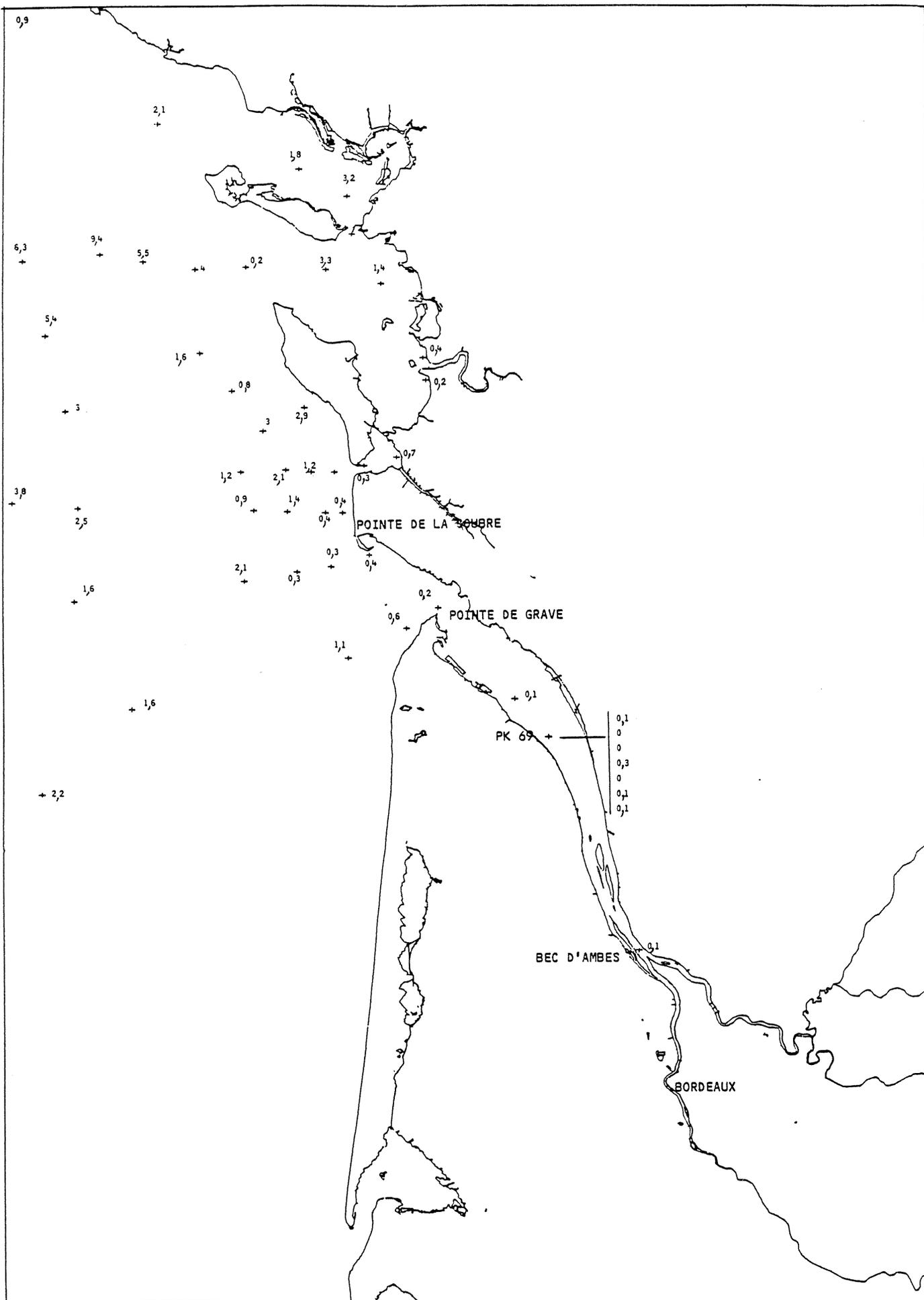


Figure 28 - Campagne CAGIMA II. Teneur en chlorophylle des matières en suspension (microgrammes pour 10 g de matière sèche) des eaux superficielles.

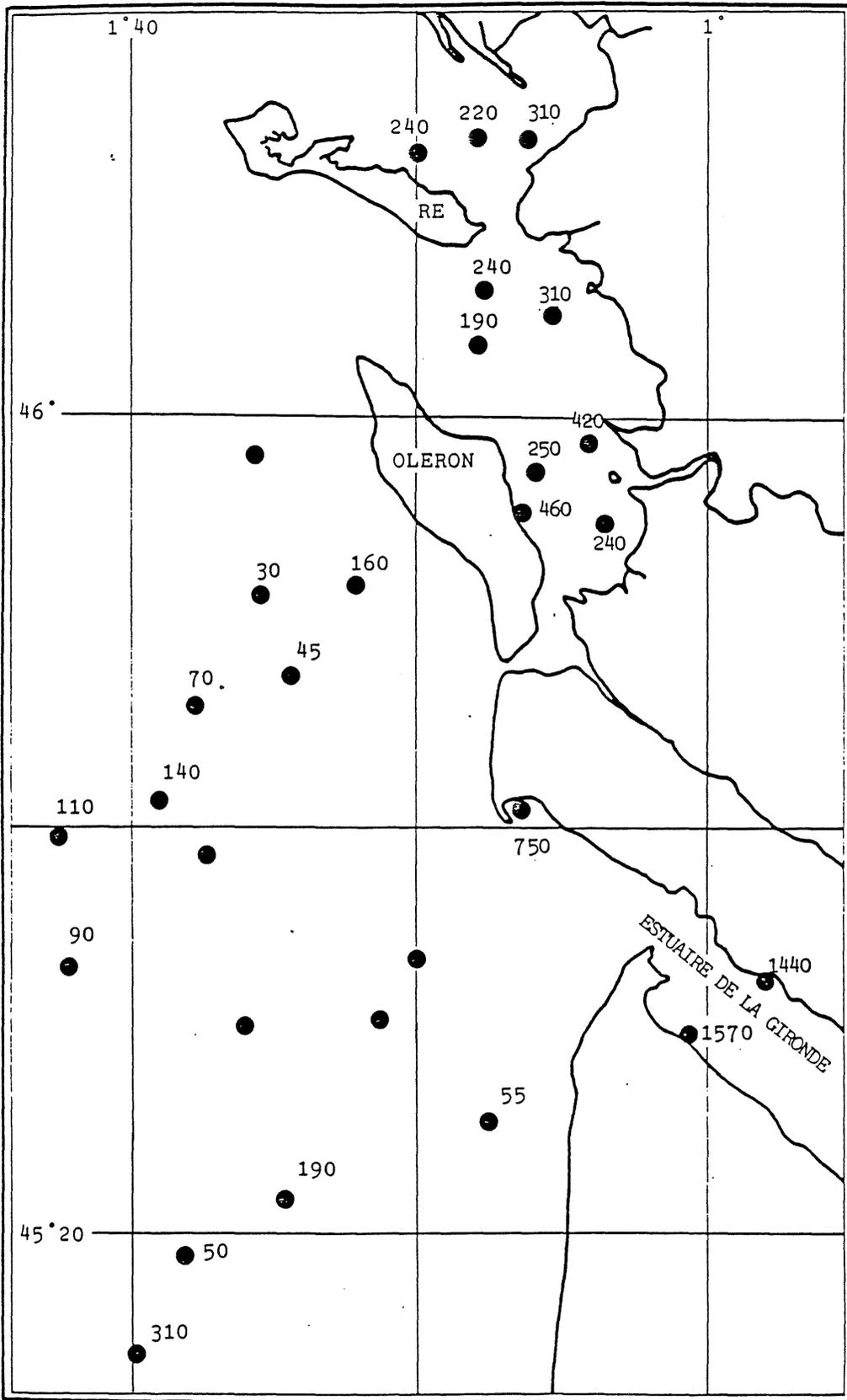


Figure 29 - Teneurs en cadmium des sédiments superficiels ($\mu\text{g.kg}^{-1}$, campagne CAGIMA I).

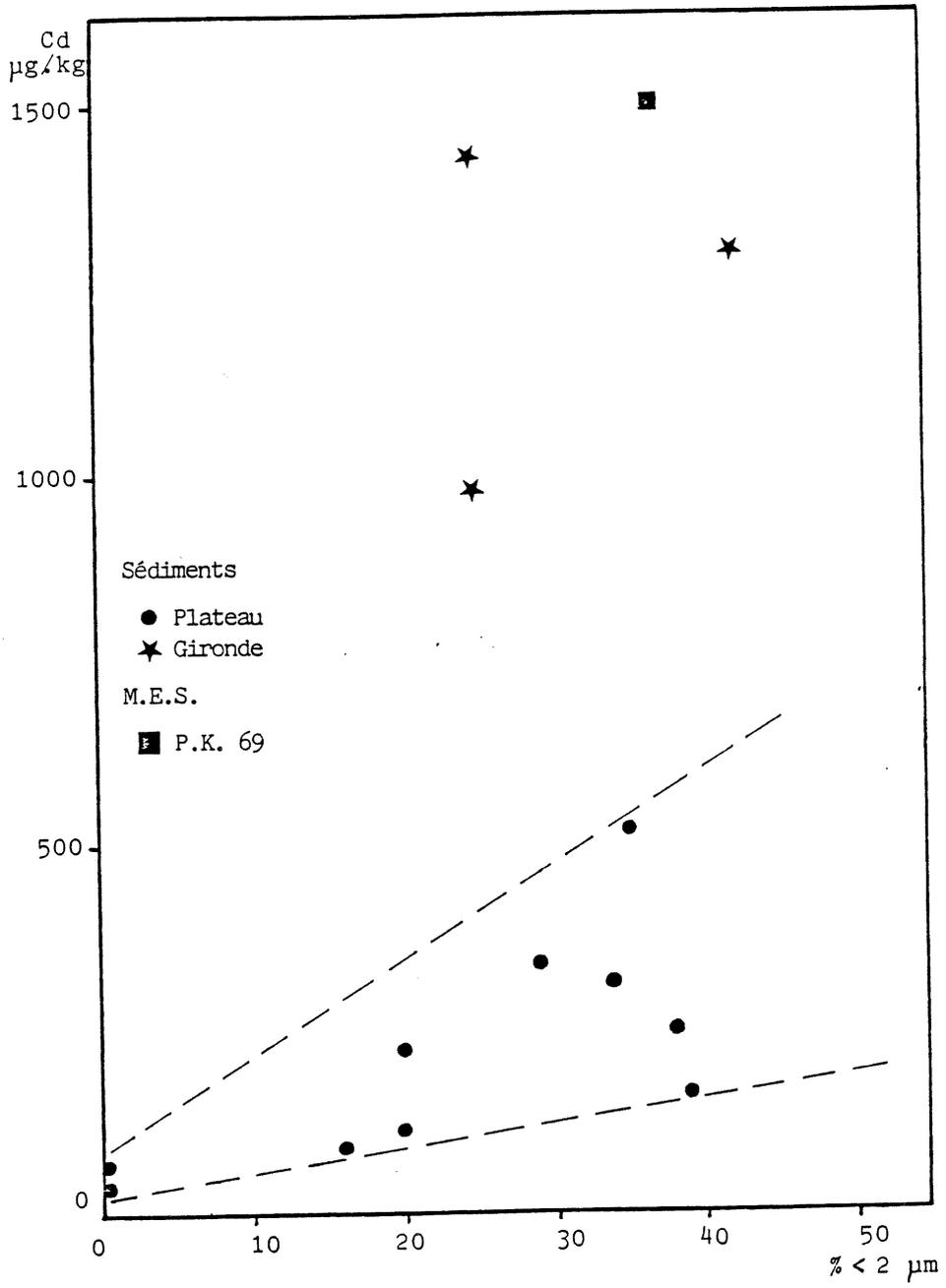


Figure 30 - Relation entre la quantité de matériel fin et la teneur en cadmium dans les sédiments prélevés en Gironde et sur le proche plateau continental.

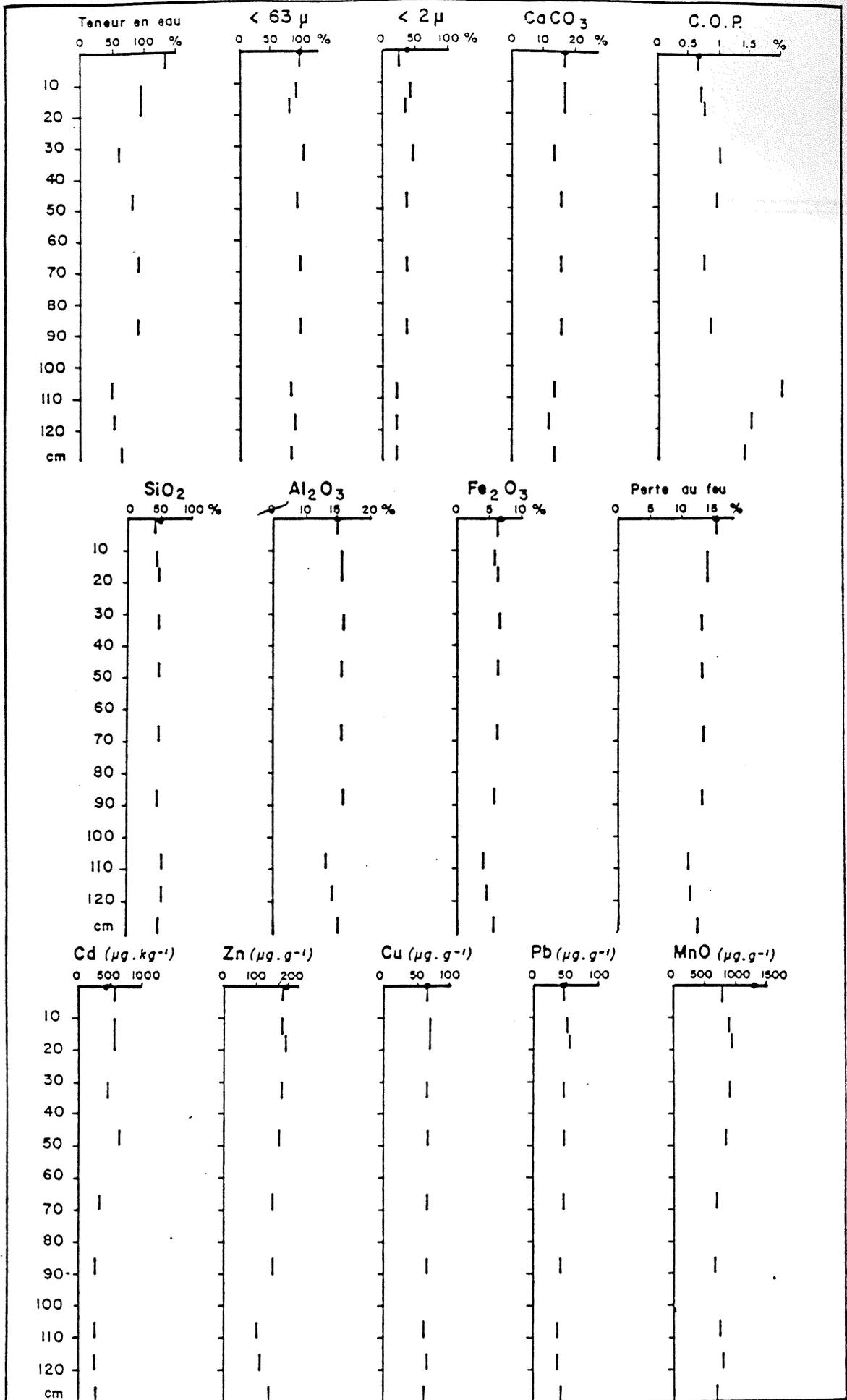


Figure 31 - Caractéristiques sédimentologiques et géochimiques de la carotte d'Oléron.

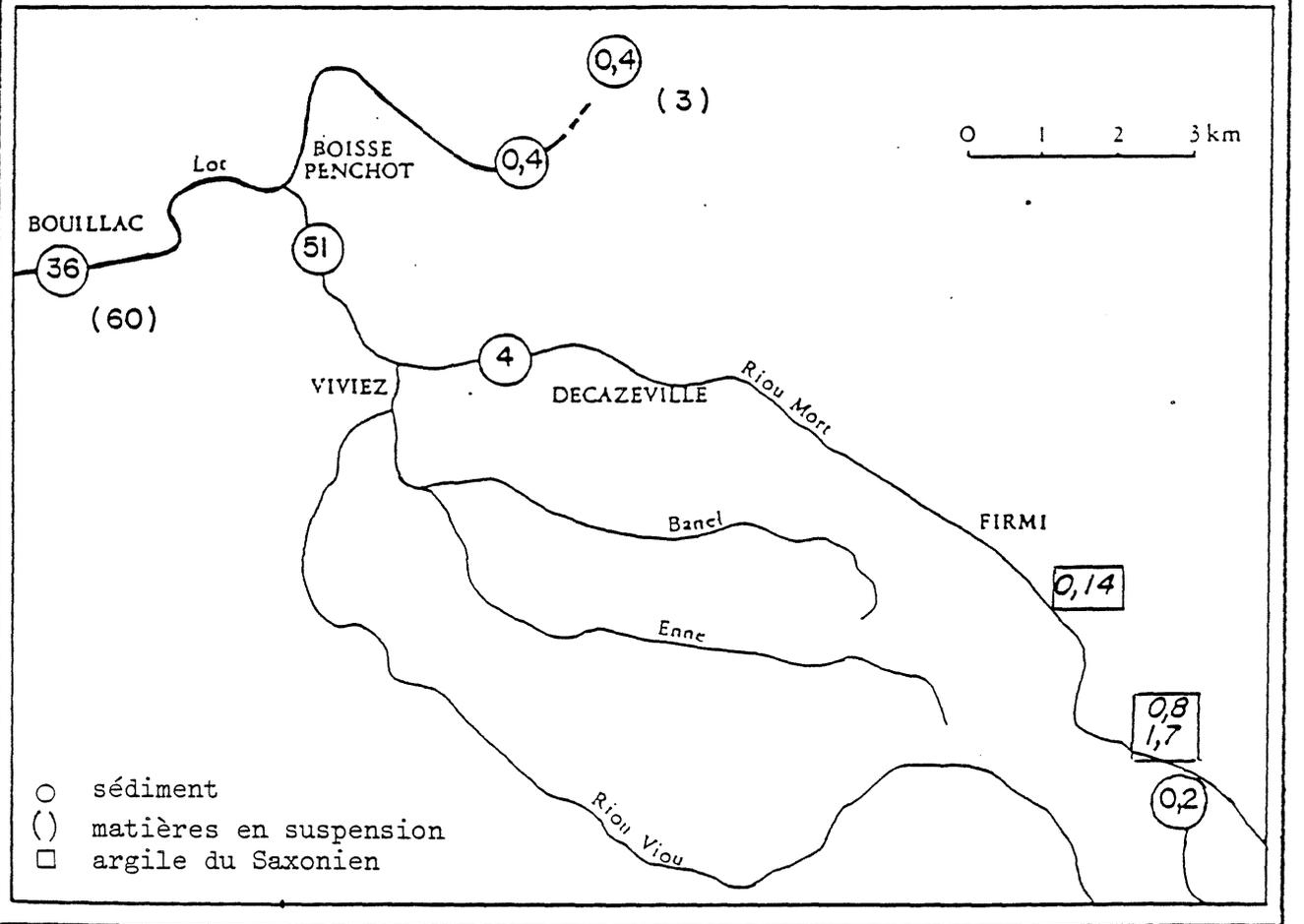
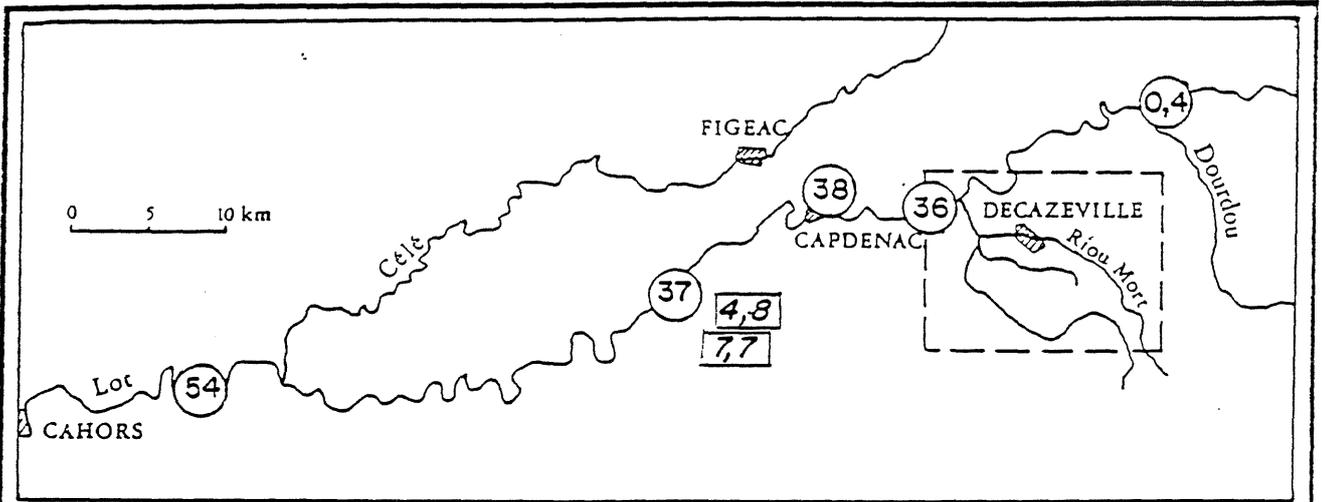


Figure 32 - Teneurs en cadmium particulaire mesurées dans le bassin du Lot (mg.kg^{-1}).
Echantillonnage de janvier 1986.

TABLEAUX

N° DE STATION	LATITUDE NORD	LONGITUDE OUEST	POINT KILOMETRIQUE
1	46° 19, 4'	1° 40	
2	46° 16, 6'	1° 27, 5'	
3	46° 15, 2'	1° 21, 4'	
4	46° 12, 7'	1° 15, 2'	
5	46° 09, 2'	1° 14, 6'	
6	46° 06, 8'	1° 57, 5'	
7	46° 07, 4'	1° 47, 4'	
8	46° 06, 7'	1° 41, 8'	
9	46° 06, 2'	1° 28, 3	
10	46° 06, 0'	1° 17, 9'	
11	46° 04, 7'	1° 10, 8'	
12	46° 00, 4'	1° 11, 5'	
13	45° 58, 0'	1° 05, 4'	
14	45° 56, 00	1° 05, 00	
15	46° 53, 2'	1° 10, 2'	
16	45° 49, 00	1° 08, 8'	
17	45° 48, 2'	1° 13, 00	
18	45° 47, 6'	1° 16, 8'	
19	45° 47, 6'	1° 19, 8'	
20	45° 47, 8'	1° 23, 1'	
21	45° 47, 6'	1° 29, 0'	
22	45° 51, 4'	1° 26, 1'	
23	45° 53, 5'	1° 20, 7'	
24	45° 55, 0'	1° 30, 2'	
25	45° 58, 4'	1° 34, 4'	
26	46° 01, 7'	1° 38, 0'	
27	45° 43, 8'	1° 15, 8'	
28	45° 43, 8'	1° 18, 00	
29	45° 43, 9'	1° 22, 9'	
30	45° 44'	1° 27, 3'	
31	45° 39, 9'	1° 12, 4'	
32	45° 38, 8'	1° 17, 3'	
33	45° 38, 3'	1° 21, 7'	
34	45° 37, 4'	1° 28, 6	
35	45° 33, 1'	1° 07, 6'	
36	45° 30, 3'	1° 15, 15'	
37	45° 29, 2'	0° 56, 3'	PK 85*
38	45° 21, 3'	0° 48, 3'	PK 67*
39	45° 10, 8'	0° 43, 6'	PK 45*
40	45° 06, 3'	0° 41, W	PK 35*
41	45° 57, 5'	0° 32, 6'	PK 15*
42	45° 50, 3'	0° 33, 9'	PK 0*
43	45° 35, 0'	1° 03, 5'	

Tableau 4 : Liste des points de prélèvement d'eau lors de la campagne CAGIMA I.

* PK est l'abréviation de point kilométrique. PK X désigne un point situé à X kilomètres du pont de pierre de Bordeaux, vers l'aval si $X > 0$, vers l'amont si $X < 0$.

N° DE STATION	LATITUDE NORD	LONGITUDE OUEST	POINT KILOMETRIQUE
1 à 36	Voir CAGIMA I (Tab.4)		
37	45° 29, 2'	0° 56, 3'	PK 85
39	45° 10, 8'	0° 43, 7'	PK 45
43	45° 35, 0'	1° 03, 5'	-
44	45° 25, 5'	1° 43, 3'	-
45	45° 17, 5'	1° 55, 0'	-
46	45° 12, 3'	2° 00, 0'	-
47	45° 35, 5'	1° 50, 8'	-
48	45° 32, 4'	1° 57, 6	-
49	45° 44, 2'	1° 50, 3'	-
50	45° 44, 7'	1° 58, 8'	-
51	45° 53, 2'	1° 51, 9'	-
52	46° 00, 0'	1° 54, 8'	-
53	46° 06, 0'	1° 35, 0'	-
54	46° 30, 8'	2° 00, 0'	-
56	46° 26, 5'	0° 53, 5'	PK 77
57	45° 15, 5'	0° 45, 0'	PK 55
58	45° 03, 2'	0° 37, 3'	PK 30
59 - 65	45° 23, 0'	0° 49, 1'	PK 69

Tableau 5 : Coordonnées des stations de la campagne CAGIMA II.

N° DE STATION	LATITUDE NORD	LONGITUDE OUEST	POINT KILOMETRIQUE	REFERENCE
118	45° 35, 6' N	1° 03, 2' W	PK 96	Le Verdon
117	45° 16, 3' N	0° 45, 1' W	PK 55	Point fixe
163	45° 29, 9' N	0° 57, 4' W	PK 85	
162	45° 22, 4' N	0° 49, 15' W	PK 67	Bouée 33
160	45° 20, 4' N	0° 47, 5' W	PK 64	Bouée 29
159	45° 22, 8' N	0° 49, 6' W	PK 68	Bouée 25
158	45° 24, 2' N	0° 51, 3' W	PK 71	Bouée 20
157	45° 27, 1' N	0° 53, 8' W	PK 78	
B1	45° 55, 1' N	0° 33, W	PK 10	Bouée 67
B2	45° 02, 7' N	0° 36, 8 W	PK 26	Barbe d'Esquire
B3	45° 02, 7' N	0° 35, 9' W	PK 25	Bouée 65
B4	45° 59, N	0° 32, 6 W	PK 18	
B5			PK - 40	
B8			PK - 34	
B9			PK - 21	

Tableau 6 : Coordonnée des stations de la campagne INTERSITE III.

RIVE DROITE		
Localisation	Dates de prélèvement	Cd
Cordouan	16.06.83	12.5
Bonne Anse	09.03.82	49.5
	20.07.82	30.4
Vaux	04.10.82	52.7
Pontailiac	20.07.82	63.4
	04.10.82	96
Royan	04.10.82	105
Vallières	26.06.82	88
	04.06.82	95
Saint Georges	04.10.82	105
Suzac	04.10.82	76
Meschers	26.06.82	107
Dau	26.06.82	149
	28.09.82	109
	29.03.82	228
Cabane	28.09.82	100
Boeuf	28.09.82	113
Talmont	04.10.82	150
RIVE GAUCHE		
La Chambrette	26.03.82	72
	10.05.82	59
	05.08.82	66
	01.02.83	121
Cabiraux	08.04.82	101
La Fosse	06.04.82	132
Mondésir	26.03.82	173

Tableau 7 : Répartition géographique des teneurs en métaux dans les huîtres de Gironde. Résultats ($\mu\text{g/g}$ de matière sèche).

LOCALITE	HUITRES	MOULES
CABIRAUX 8/04/82	101	30.3
DIGUE DE LA CHAMBRETTE 10/05/82	58.5	20.3

Tableau 8 : Comparaison entre les teneurs en cadmium des huîtres et des moules prélevées simultanément sur les mêmes stations (microgrammes par gramme de matière sèche).

LIEU DE PRELEVEMENT	Cd
Cabiraux	30.3
La Chambrette	20.3
Seine - Digue nord du Havre (moyenne 1982)	3.7
Loire - Ville es Martin (moyenne 1982)	1.5

Tableau 9 : Teneurs en Cd dans les moules de différents estuaires industrialisés (microgrammes par gramme de matière sèche).

IMPLANTATION ESTIVALE			IMPLANTATION HIVERNALE	
Station	Date	Cd ($\mu\text{g/g}$)	Date	Cd
DAU	10 mai (implantation)	4,23	26 octobre (implantation)	3,85
	26 juillet	3,66	2 décembre	8,9
	27 septembre	36,9	20 janvier	9,9
	26 octobre	39,3	2 mars	12,9
			30 mars	18,9
			18 mai	20,1
LA FOSSE	10 mai (implantation)	4,23	20 octobre (implantation)	4,3
	15 juin	17,8	6 décembre	8,3
	11 juillet	29,5	20 février	14,1
	10 août	71,8	21 mars	16,3
	20 octobre	80,3	19 avril	18,0

Tableau 10 : Etude de la cinétique d'accumulation du cadmium par les huîtres témoins d'Arcachon implantées en Gironde (concentrations dans les tissus mous en microgrammes par gramme de poids sec).

REF. DE L'ECHANTILLON	CADMIUM
Huîtres-témoins provenant d'Arcachon 10.05.83	4.2
Valeurs après 6 mois d'implantation 20.10.83	80
Moyenne RNO 82 La Fosse	81

Tableau 11 : Comparaison entre les résultats de l'expérience d'implantation en Gironde d'huîtres provenant d'Arcachon et les concentrations moyennes en cadmium des huîtres autochtones à la Fosse ($\mu\text{g/g}$, matières sèches).

NUM. STAT	SAL. SURF. g/l	SAL. FOND g/l	TEMP. SURF. °C	TEMP. FOND °C	MES SURF. mg/l	COP SURF. ‰	CHLORO PARTIC mg/10g	Cd SURF DISSOUS ng/l	Cd FOND DISSOUS ng/l
1	33.82	34.68	16.6	12.4				20	<40
2	33.54	34.24	18.9	14.4	5.6	2.6	2.8	40	<20
3	33.50	34.01	18.2	15.9	2.7		7.1	34	30
4	33.32	33.36	20.1	18.5	4.5		4.3	50	
5	33.32	34.18	19.1	15.4	6.8		4.8	20	<10
6	33.46	35.09	18.0	11.6	1.7		2.2	<10	<10
7	33.84	35.08	16.9	12.2	1.0		3.6	10	<10
8	33.78	35.04	17.0	12.5	1.4		3.9	20	20
9	33.93	34.79	17.4	13.5	1.3	10.1	11.5	30	<10
10	33.08	34.43	19.5	14.6	9.4		2.0	20	<10
11	33.22	33.24	18.7	18.5	13.5	7.8	1.7	10	20
12	32.70	33.99	20.2	15.9	19.3	1.8	1.6	10	<10
13			22.2		15.9	4.7	2.5	<10	
14	32.08		21.1		29.0	2.5	1.6	60	
15	32.79		19.5		9.3	3.3	3.2	40	
16	32.35		21.1		33.9	1.9	1.0	30	
17	33.37		18.6					<30	
18	33.36	33.83	18.8	17.5	14.7	2.1	1.2	40	<10
19	33.31	34.87	18.5	13.9	8.0		2.3	40	<20
20	33.24	34.94	18.8	13.6	11.5	2.4	1.3	<30	40
21	33.74	35.08	17.9	12.8	19.5		0.4	30	<20
22	34.07	34.97	17.9	13.4	1.8		5.4	20	<20
23	33.89	34.55	18.2	15.5	9.4	2.6	1.2	20	<10
24	33.80	34.94	17.0	13.3	2.2		3.9	<40	<20
25	33.65	35.09	17.7	12.6	0.3		13.3	<20	<10
26	33.78	35.05	17.2	12.4					20
27	32.81	33.02	17.9	17.9	3.3	8.2	4.4	50	40
28	33.46	33.76	18.9	16.2	2.8	8.5	4.6	40	<30
29	33.41	34.74	19.2	14.0	3.5	6.6	3.9	<30	30
30	33.75	35.08	18.6	12.7	2.1	10.7	6.0	<30	20
31	29.46	29.69	17.7	17.4	21.0	1.5	1.0	50	100
32	29.52	30.75	17.8	17.1	15.8	1.5	1.6	50	60
33	32.64	34.90	16.3	13.5	4.9	7.1	4.1	50	<10
34	31.56	35.18	18.1	12.8	5.2	4.9	4.1		30
35	34.19	34.19	16.2	16.0	0.8		16.9	30	30
36	32.02	33.19	17.5	13.8	2.1		11.0	50	<30
37	15.04		20.9		254.0	0.8	0.1	380	
38	2.53		21.9		586.0	0.9	0.0	60	
39	0.15		22.0		301.0	0.9	0.1	40	
40	0.20		22.0		507.0	1.1	0.1	20	
41	0.13		22.0		51.5		1.6	40	
42			22.0				0.0	130	
43	27.33	27.38	18.4	18.4	13.4	1.8	1.5	290	170

Tableau 12.- Résultats de la campagne CAGIMA I.

NUM. STAT	SAL. SURF. g/l	SAL. FOND g/l	TEMP. SURF. °C	TEMP FOND °C	MES SURF. mg/l	COP SURF. ‰	CHLORO PARTIC mg/10g	Cd SURF DISSOUS ng/l	Cd PARTIC. mg/kg
01	32.46	32.68	8.7	8.2	3.8	6.7	2.1		0.7
02	32.37	32.54	8.2	7.8	2.8	9.0		16	0.5
03	31.90	32.49	7.7	7.6	2.8	7.8	1.8	34	1.6
04	30.83	30.72	8.5	8.1	3.9	3.2	3.2	40	2.6
05	30.91	32.32	8.6	8.1	7.9	2.0		77	0.3
06	34.87	34.89	9.5	9.8	1.5	6.2	6.3	17	1.5
07	32.47	34.37	9.5	9.1	1.5	6.3	9.4	4	
08	31.70	33.76	9.8	9.1	2.2	3.4	5.5	42	2.6
09	31.37	33.22	9.6	8.7	2.8	5.7	0.2		0.9
10	31.99	32.77	8.8	7.7	3.3	4.5	3.3	31	0.9
11	30.25	32.05	8.7	8.1	4.1	3.3	1.4	26	0.3
12	31.00	32.21	8.9	7.9	4.1			55	
13	0.28		9.2		89.8	1.7	0.4	60	
14	27.88				170.8	1.4	0.2	79	0.2
15	29.99				13.0	1.7		<44	0.3
16	28.58				17.1	2.3	0.7		0.3
17	29.33				51.9	1.9	0.3	<40	0.6
18	30.19	32.18	8.6	8.4	9.1	2.6		33	0.8
19	31.90	34.15	8.4	9.5	7.6	1.7	1.2	17	0.6
20	32.63	33.94	7.8	8.9	5.4	4.2	2.1		1.0
21	31.08	34.73	8.7	9.8	6.3	1.1	1.2	34	
22	29.68	34.00	9.0	8.7	3.5	3.1	3.0		0.4
23	30.40	32.58	8.8	8.9	3.7	3.5	2.9	41	1.2
24	29.05	34.53	9.4	9.0	4.0	1.7	0.8		1.6
25	29.68	34.64	9.6	9.2	4.8	1.8	1.6		
26	31.99	34.53	9.8	10.0	2.3	5.2			
27	28.30	30.70	9.0	8.6	22.3	1.1	0.4		
28	29.21	32.35	9.0	8.9	25.2	1.8	0.4	54	0.6
29	30.77	33.52	8.4	9.5	6.4	1.9	1.4	59	1.2
30	31.44	34.83	8.3	9.7	9.7	1.5	0.9	33	1.0
31	28.84	31.69	8.7	8.5	21.6	1.8	0.4	110	0.6
32	27.09	32.68	8.0	9.2	26.9	2.3	0.3	55	
33	32.18	32.68	9.4	9.3	29.7	4.0	0.3	42	0.6
34	33.90	34.90	9.5	10.4	4.1	1.7	2.1	34	1.0
35	33.25	34.38	9.4	9.3	11.3	1.5	0.6	32	2.5
36	35.02	34.87	10.2	9.8	8.8	0.9	1.1	12	2.6
37	15.16		8.7		42.8	0.8		120	0.5
39	0.41		8.1		309.0	1.1	0.0	51	0.9
43	22.82	25.01	8.8	8.8	57.4	1.2	0.2		0.6
44	35.28	35.14	10.6	10.1	2.8	2.2	1.6	23	2.1
45	35.39	35.44	11.3	10.8	1.8	2.0	2.2	9	
46	35.45	35.27	10.3	10.6	2.0			34	
47	35.12	35.01	10.4	10.4	3.6	1.5	1.6	32	
48	35.33	35.25	11.1	11.0				14	
49	35.05	35.04	10.6	10.6	2.3	2.7	2.5	8	1.4
50	35.24	35.19	10.6	10.6	1.4	12.2	3.8		1.0
51	34.94	35.01	9.7	9.7	2.4	6.1	3.0	28	0.4
52	34.43	34.62	9.1	9.6	1.7	7.6	5.4	23	1.3
53	30.22	33.42	9.7	8.8	2.8	4.0	4.0	33	0.9
54	32.09	36.58	8.4		4.3	4.9	0.9		0.6
56	9.45		8.0		63.4	0.8	0.1	220	
57	0.88		8.4		323.0	1.0	0.0	94	
58	0.19		7.7		161.1	1.1	0.1	100	4.6
59	5.92		8.9		186.8	1.0	0.1	310	0.6
60	3.77		8.3		162.5	0.9	0.0	160	0.9
61	2.50		8.5		531.6	1.2	0.0	270	0.8
62	1.56		8.8		138.7		0.3	230	1.0
63	3.68		8.5		507.0	1.1	0.0	150	0.5
64	5.73		8.2		116.5	1.2	0.1	120	0.7

Tableau 13.- Résultats de la campagne CAGIMA II.

N° de station	Salinité ‰	Turbidité NTU	Cd dissous ng/l	Cd particulaire µg/g
7	34,4		18	
11	34,1		15	
15	33,3		49	
17-1	9,1	170	69	
17-2	5,2	400	120	
17-3	4,7	400	42	
17-4	8,4	39	380	
17-5	12,4	104	270	
18	28,7	22	94	0,24
27	33,5		27	
57	26	19	340	
58	22	18	275	0,45
59	18,4	20	420	1,04
60	11,6	12	164	0,3
62	17,2		395	0,2
63	23,9	13		0,14
B1	0,6	239	86	2,5
B2	3,4	70	31	6
B3	1,9	80	49	2,2
B4	1,1	105	21	
B5	< 0,2	15	13	0,6
B8	< 0,2	43	19	
B9	< 0,2	225	22	

Tableau 14 - Résultats de la campagne INTERSITE III.

Niveau	Cd $\mu\text{g.Kg}^{-1}$
Surface	1570
0-5	1500
5-10	1200
15-20	1200
25-30	1030
35-40	940
55-60	660
75-80	370
85-90	520
95-100	1150

Tableau 15 : Teneurs en cadmium dans la carotte du Verdon.

Niveau	Cd $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Surface	1440
5-10	1490
15-20	1650
25-30	840
35-40	360
55-60	340
70-75	190
85-90	300
95-100	170
105-110	170

Tableau 16 : Teneurs en Cadmium dans la carotte de Talmont.

Niveau	Cd $\mu\text{g.kg}^{-1}$
Surface	750
5-10	800
10-15	890
15-20	1290
25-30	720
45-50	790
60-65	650
80-85	630
95-100	450
110-115	420
120-125	400

Tableau 17 : Teneurs en cadmium dans la carotte de La Coubre.

DATE	DEBITS	ORIGINE	CONCENTRATION	REFERENCE
Octobre 82	faibles débits	Garonne	55	ELBAZ POULICHET <u>et al.</u> (1987)
Août 85	étiage	Garonne	13-20	Ce travail
Août 85	faibles débits	Dordogne	<20	ELBAZ POULICHET <u>et al.</u> (1987)
Avril 86	forts débits	Garonne	250	Ce travail
Février 88	forts débits	Garonne	112	Ce travail
Février 88	forts débits	Dordogne	10	Ce travail

Tableau 18 : Concentration en cadmium dissous en amont du système estuarien Garonne-Dordogne (ng/l).

STATION	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	P.Feu
S1	45.8	13.0	5.2	0.054	1.2	11.9	0.547	1.6	1.3	0.21	18.8
S2	41.3	11.5	4.8	0.083	2.6	16.0	0.529	0.9	1.6	0.22	20.0
S3	44.4	12.2	5.6	0.100	1.1	12.5	0.623	1.4	1.8	0.22	19.6
S4	47.8	12.0	4.9	0.062	1.0	11.9	0.558	1.4	1.6	0.21	18.2
S5	48.5	12.4	5.6	0.081	0.9	10.8	0.675	1.6	1.7	0.21	17.1
S6	45.2	11.2	4.8	0.067	1.1	18.3	0.546	1.1	1.6	0.20	15.3
S7	45.2	14.9	6.7	0.114	1.2	9.6	0.728	1.8	1.7	0.23	17.5
S8	51.3	11.8	4.9	0.067	0.9	11.7	0.571	1.7	1.6	0.22	14.9
S10	47.6	13.4	6.0	0.080	1.1	10.5	0.694	1.7	1.8	0.21	16.7
S11	63.7	9.8	3.8	0.083	1.7	8.9	0.652	2.0	1.5	0.20	7.3
S12	74.2	8.0	2.9	0.071	0.3	5.0	0.617	1.9	1.5	0.21	5.1
S13	71.4	9.0	2.7	0.060	0.5	6.0	0.386	2.1	1.6	0.20	6.1
S14	64.4	9.9	3.6	0.076	1.9	8.1	0.733	1.9	1.5	0.20	7.5
S15	57.9	13.2	5.4	0.084	1.6	6.7	0.923	2.1	1.6	0.20	9.9
S16	55.0	14.2	6.0	0.077	1.6	6.3	0.839	2.3	1.7	0.20	11.5
S19	52.0	11.0	5.1	0.070	0.4	13.2	0.659	1.5	1.5	0.21	14.1
S22	73.2	8.1	2.9	0.071	0.5	5.5	0.568	1.8	1.2	0.19	5.7
S23	51.8	14.3	6.8	0.096	1.5	7.1	0.874	2.4	1.7	0.22	13.0
S24	61.9	12.3	4.5	0.065	1.7	7.7	0.749	2.1	1.7	0.20	6.8
S25	53.6	14.8	7.0	0.066	1.3	6.9	0.793	2.4	1.7	0.22	10.8

Tab.19 : Teneur en éléments majeurs dans les sédiments superficiels du plateau continental aquitain (%).

STATION	Pb	Cu	Zn	Ni	Zr	Rb	Sr	S	Cr	Co	Ga
S1	53	31	171	37	73	168	441	2883	60	3.1	22
S2	40	26	149	32	84	153	477	2643	54	0.1	15
S3	41	33	175	33	72	157	409	2406	57	0.1	18
S4	51	33	166	38	80	163	439	2388	58	1.2	17
S5	51	27	171	34	110	161	380	1999	59	0.1	18
S6	43	26	136	31	106	152	464	3189	53	0.1	14
S7	67	31	220	46	65	172	334	2144	72	8.2	20
S8	42	25	140	30	100	155	415	2086	50	0.1	11
S10	44	44	192	43	60	137	258	2162	59	0.1	18
S11	29	20	84	21	266	135	349	1517	32	0.1	12
S12	23	30	65	17	293	125	326	495	27	0.1	10
S13	20	29	71	17	132	135	354	794	25	0.1	9
S14	30	30	77	22	305	135	337	1165	32	0.1	10
S15	50	20	123	38	254	158	311	1624	56	0.1	17
S16	58	30	159	36	130	163	312	1820	55	0.1	23
S19	46	20	136	33	160	144	494	1699	57	5.9	14
S22	120	31	77	20	260	130	321	680	32	0.1	12
S23	49	32	189	40	109	177	319	1604	72	10.3	21
S24	40	30	95	27	182	143	306	1747	45	0.1	15
S25	44	28	174	44	68	164	311	1905	76	0.1	18

Tableau 20 :: Concentration en éléments traces des sédiments du plateau continental aquitain ($\mu\text{g/g}$).

Station	Cd (Cagima I)	Cd (Cagima II)
S 1	240	
S 2	220	250
S 3	310	
S 4	240	
S 5	310	
S 6	190	
S 7	420	520
S 8	250	
S 10	240	310
S 11	160	160
S 12	30	
S 13	45	35
S 14	70	60
S 15	140	110
S 16	110	
S 19	90	
S 22	55	
S 23	190	
S 24	50	
S 25	310	90
Banc d'AGNAS (H 15)		220
Marennes (H 16)		340

Tableau 21 : Teneurs en cadmium des sédiments du plateau continental et de la baie de Marennes-Oléron ($\mu\text{g}/\text{kg}$).

NIVEAU	Cd $\mu\text{g}/\text{kg}^{-1}$
Surface	460
0- 5	540
10-15	530
15-20	530
30-35	430
45-50	630
65-70	320
85-90	250
105-110	240
115-120	230
125-130	270

Tableau 22 : Concentration en cadmium dans les sédiments carottés à Bellevue.

ECHANTILLON	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	P. feu
Pt 1. RIOU VIOU	72.5	14.9	3.9	0.02	0.9	0.3	0.77	2.5	0.9	0.17	3.0
Pt 2. ENNE	68.5	15.5	5.1	0.01	0.8	0.8	0.37	3.1	1.3	0.23	3.7
Pt 3. RIOU MORT (Tols)	80.2	11.9	1.8	0.11	0.7	0.5	0.42	1.6	1.1	0.16	1.5
Pt 3b. Affluent R.M. (Tols)	76.3	12.9	2.9	0.05	0.8	0.4	0.55	1.6	2.0	0.16	2.1
Pt 4. R.M. (aval Firmi)	73.9	12.1	4.0	0.11	1.6	1.9	0.31	1.7	1.1	0.21	2.8
Pt 5. R.M. (amont Viviez)	29.5	6.7	40.2	0.11	0.1	10.2	0.27	1.0	1.4	0.28	9.5
Pt 6. R.M. (aval Viviez)	63.3	11.2	12.9	0.50	0.7	1.7	0.94	2.0	1.1	0.18	2.0
Pt 7. LOT (Coursavy)	50.2	19.9	6.5	0.25	1.5	0.9	0.90	3.0	0.9	0.27	15.4
Pt 8. LOT (Le Pessy)	62.5	16.6	4.3	0.13	2.1	2.1	0.70	2.6	1.2	0.21	7.4
Pt 9. LOT (Bouillac)	61.2	14.8	7.7	0.25	1.5	1.1	0.94	2.5	0.9	0.22	7.0
Pt 10. LOT (Capdenac)	62.9	14.4	5.9	0.15	1.6	1.5	0.67	2.2	1.3	0.21	8.1
Pt 11. LOT (St-Pierre)	55.1	16.7	6.5	0.24	1.6	2.0	0.44	2.7	1.1	0.25	12.6
Pt 12. LOT (St-Géry)	54.1	17.8	6.2	0.22	1.7	2.5	0.77	2.7	1.1	0.27	11.7
M.E.S. LOT amont	41.6	18.0	7.4	0.29	0.9	5.1	0.96	2.3	0.7	0.37	21.9
M.E.S. LOT aval	39.2	19.1	11.0	0.08	1.5	2.4	1.20	2.8	1.3	0.37	20.3
Sol surf. (Tols)	68.0	15.5	3.1	0.10	1.1	0.6	0.56	1.9	1.7	0.17	7.0
Sol 50 cm (Tols)	69.7	15.0	3.5	0.07	1.1	0.6	0.56	2.0	1.4	0.17	5.8
Sol surf. (St-Pierre)	60.8	16.4	4.9	0.08	1.4	0.8	0.65	2.7	1.0	0.23	10.7
Sol 50 cm (St-Pierre)	57.6	19.0	6.0	0.17	2.5	1.4	0.80	3.1	1.0	0.20	7.9
Argile Saxonien	68.3	17.1	2.0	0.29	0.4	2.6	0.86	1.9	1.4	0.16	5.0

Tableau 23 : Concentration en élément majeurs de sédiments du Lot et du Riou Mort (%). (Echantillonnage de janvier 1986).

Achévé d'imprimer
au Centre IFREMER-Brest
Atelier de reproduction

dépôt légal 3ème trimestre 1989